

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vladimir Macura

Zagreb, 2019

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Vladimir Macura

Zagreb, 2019 godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz stručnu pomoć prof. dr.sc Darka Landeka koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli u izradi ovog rada , Dr. sc. Ivan Kumiću , mag.ing. , asistentu Draženu Mezdiću te laborantu Ivanu Vovku na pomoći pri provođenju eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem mentoru izv.prof.dr.sc Darku Landeku na vremenu , savjetima i strpljenju.

Hvala svim profesorima i asistentima na znanjima i vještinama koje su me naučili.

Veliko hvala prijatelju Petru Filipoviću kao i kolegama sa smjera Antunu Balatonu, Luki Radoniću te Tomislavu Kosoru na svim druženjima i zajedničkom učenju. Također hvala mojoj djevojci Romani na podršci i strpljenju.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji pogotovo svojim roditeljima na ljubavi i podršci tijekom studija i svemu što su učinili za mene.

Hvala Bogu što mi je dao snage da savladam i ovaj izazov u svom životu.

Vladimir Macura



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **VLADIMIR MACURA** Mat. br.: **0035189652**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Istraživanje utjecajnih čimbenika na točnost i preciznost određivanja faktora trenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Investigating influential factors on the accuracy and precision of determining the coefficient of friction**

Opis zadatka:

Vrijednost faktora trenja konkretnih materijala kliznoga para u ponovljivim uvjetima opterećenja i podmazivanja važna je veličina za niz primjena. Za ispitivanja faktora trenja primjenjuju se različite eksperimentalne metode od kojih se, zbog raznovrsnih kombinacija ispitnih uvjeta, posebno ističe metoda s pritiskom uzorka na klizni prsten (metoda „blok na prstenu“).

U radu treba opisati utjecajne čimbenike na faktor trenja i adhezijsko trošenje na uređaju s kliznim prstenom te procijeniti njihovo djelovanje na točnost i preciznost ispitivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada provesti ispitivanje faktora trenja i adhezijskog trošenja prstena izrađenog od poboljšanog čelika EN 100Cr6, bez podmazivanja, za različita stanja površine prstena, različito normalno opterećenje i vrijeme ispitivanja. U kliznom paru s prstenom upotrijebiti blok izrađen od čelika EN X5CrNi18-10 prevučen prevlakom PACVD TiCN. Različita stanja površine prstena postići primjenom postupaka nitiranja u plinu, plazmi i solnoj kupci te postupkom prevlačenja PACVD TiN. Rezultate ispitivanja statistički obraditi te definirati mjerno područje i točnost korištenog uređaja za određivanja otpornosti na adhezijsko trošenje metodom „blok na prstenu“.

Naveći u radu korištenu literaturu, izvore informacija i stručnu pomoć.

Zadatak zadan:
07. ožujka 2019.

Rok predaje rada:
09. svibnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
15. svibnja 2019.
16. svibnja 2019.
17. svibnja 2019.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. Trenje.....	2
2.1. Pojava trenja u prirodi i tehnici.....	2
2.2. Vrste trenja.....	3
3. Ispitivanje faktora trenja i otpornosti na adhezijsko trošenje	6
3.1. Tribo-sustav za ispitivanje faktora trenja.....	6
3.2. Adhezijsko trošenje.....	7
3.3. Otpornost na adhezijsko trošenje	7
3.4. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje metodom „Block on Ring“	10
3.5. Usporedba izmjerenog i proračunskog progiba opruge	11
4. Modernizacije uređaja za ispitivanje metodom Prizme na prstenu	13
4.1. Izbor induktivnog senzora.....	13
4.2. Točnost i preciznost mjerenja	17
5. Kontaktna naprezanja	19
6. Primjena i toplinska obrada čelika 100 Cr6.....	23
6.1. Difuzijske pojave pri nitriranju	24
6.1.1. Plinsko nitriranje.....	26
6.1.2. Nitriranje u solnoj kupci	27
6.1.3. Nitriranje u plazmi	28
6.2. PACVD prevlačenje.....	29
7. Karakterizacija nitriranih površina	31
7.1. Ispitivanje površinske hrapavosti.....	31
7.2. Ispitivanje mikrotvrdoće	33
7.3. Određivanje efektivne dubine nitriranja	34
7.4. Karakterizacija površine svjetlosnim mikroskopom.....	35
8. Priprema uzoraka i uređaja za ispitivanje adhezijskog trošenja	38
8.1. Toplinska obrada ispitnih uzoraka	38
8.2. Priprema uređaja za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje	40
9. Rezultati ispitivanja hrapavosti.....	43
10. Rezultati ispitivanja faktora trenja.....	46
10.1. Određivanje graničnog opterećenja tribopara i mjernog područja senzora savijanja opruge	46
10.2. Ispitivanje faktora trenja uz malo opterećenje tribosustava.....	46

10.3. Ispitivanje faktora trenja uz veće opterećenje tribosustava.....	50
10.4. Određivanje mikrotvrdoće i efektivne dubine nitriranja.....	53
10.5. Širina traga trošenja	58
ZAKLJUČAK	60
LITERATURA.....	61

POPIS SLIKA

Sl. 1 Sila trenja kao rezultat stanja površine	2
Sl. 2 Primjeri korisnog trenja; spojka i disk kočnice [4]	2
Sl. 3 Shematski prikaz suhog i mokrog trenja.....	3
Sl. 4 Odnos statičkog i dinamičkog trenja [3]	3
Sl. 5 Trenje a) klizanja, b) kotrljanja [3]	4
Sl. 6 Tribo-sustav prsten prizma	6
Sl. 7 Prikaz određivanja širine traga trošenja na prstenu s PACVD prevlakom TiN.....	6
Sl. 8 Shematski prikaz procesa adhezije kroz jedinične događaje [6]	7
Sl. 9 Rabinowitz-ova karta tribološke kompatibilnosti materijala [3]	8
Sl. 10 Prsten i prizma	10
Sl. 11 Shema uređaja Block on ring	10
Sl. 12 Prikaz progiba savojne opruge	11
Sl. 13 Princip rada induktivnog senzora [9]	13
Sl. 14 Indukcijski senzor IFM II5917	14
Sl. 15 Karakteristika izlaznog napona senzora ovisno o udaljenosti feromagnetske „mete“ [10]	14
Sl. 16 Prikaz elektroničkih komponenti uređaja [10]	15
Sl. 17 Mehanički dijelovi sklopa senzora [10] : a) matica za podešavanje udaljenosti, b) kućište senzora, c) ticalo	16
Sl. 18 Očitavanje pomaka opruge: a) pomoću mjerne ure (A), b) modernizirana varijanta s primjenom induktivnog senzora (B).....	16
Sl. 19 Vrste pogrešaka.....	17
Sl. 20 Prikaz odnosa preciznosti i točnosti [5]	18
Sl. 21 Pojava kontaktnih pritisaka dvaju valjaka i ravne površine.....	19
Sl. 22 Dodirne površine i raspodjela Hertz-ovog pritisaka za dodir tijela u točki i liniji [13].	20
Sl. 23 Prikaz kontaktnog modela ravnina cilindar kao posebni slučaj kontaktnog modela cilindar-cilindar [13].....	20
Sl. 24 Dodirna površina i kontaktno naprezanje za vrijeme djelovanja sile F za slučaj dodira u liniji [13].....	20
Sl. 25 Raspored naprezanja obzirom na udaljenost od površine.....	22
Sl. 26 Dijagram postupka poboljšavanja čelika 100Cr6	23
Sl. 27 TTT 100Cr6	23
Sl. 28 Dijagram stanja željezo dušik [15]	24
Sl. 29 Prikaz nitriranih slojeva [16]	25
Sl. 30 Uređaj za plinsko nitriranje [12]	27
Sl. 31 Prikaz uređaja za plazmatsko nitriranje [16]	28
Sl. 32 Shematski prikaz PACVD uređaja.....	29
Sl. 33 Određivanje [11] : a) profila površine, b) odstupanja profila	31
Sl. 34 Profil površine s prikazanim parametrima Ra i Rq[11]	32
Sl. 35 Potpuno različite površine za jednaki Ra [12]	32
Sl. 36 Parametri Ry, Rp i Rm prikazani na profilu površine[11].....	33
Sl. 37 Izgled indentora i otiska kod metode Vickers.....	33
Sl. 38 Određivanje efektivne dubine nitriranja (NHD)	34
Sl. 39 Osnovni dijelovi svjetlosnog mikroskopa [21]	35
Sl. 40 Princip rada svjetlosnog mikroskopa []	35
Sl. 41 Prikaz ispitnog prstena	38
Sl. 42 Postupci modificiranja površine	39
Sl. 43 Shematski prikaz postupka PACVD prevlačenja	39

Sl. 44 Ovisnost sile savijanja o produljenju savojne opruge.....	40
Sl. 45 Programsko sučelje aplikacije za prikupljanje podataka sa induktivnog senzora	41
Sl. 46 Usporedba hrapavosti.....	43
Sl. 47 Profil hrapavosti za polazno stanje	44
Sl. 48 Profil hrapavosti prstena nitriranog u plinu	44
Sl. 49 Profil hrapavosti za prsten nitriran u solnoj kupci Tenifer	44
Sl. 50 Profil hrapavosti za prsten nitriran u plazmi.....	44
Sl. 51 Profil prevučen PACVD prevlakom TiN.....	45
Sl. 52 Utjecaj povećanja sile F_n na ispitni uzorak u polaznom stanju.....	46
Sl. 53 Izmjereni naponi za pet različitih stanja površine, $F_n=11\text{ N}$	47
Sl. 54 Dijagram operacija za dobivanje faktora trenja	48
Sl. 55 Usporedba faktora trenja različitih stanja kod utega 1120 g.....	49
Sl. 56 Izmjereni naponi za 5 različitih stanja površine, $F_n=20\text{ N}$	50
Sl. 57 Usporedba faktora trenja različitih stanja kod utega 2000 g.....	50
Sl. 58 Usporedba statističkih parametara kod sile 11N.....	52
Sl. 59 Usporedba statističkih parametara kod sile 20N.....	52
Sl. 60 Metalografski pripremljen ispitni uzorka za određivanje efektivne dubine nitriranja...	53
Sl. 61 Raspored mikrotvrdoće u plinski nitriranom sloju čelika 100Cr6 i određivanje efektivne dubine nitriranja	54
Sl. 62 Raspored mikrotvrdoće u površinskom sloju čelika 100Cr6 nitriranom postupkom TENIFER.....	55
Sl. 63 Raspored mikrotvrdoće u površinskom sloju uzorka prevučenih prevlakom TiN PACVD TiN	55
Sl. 64 Raspored mikrotvrdoća za uzorak nitriran u plazmi.....	56
Sl. 65 Raspored tvrdoće po presjeku svih uzoraka usporedno	56
Sl. 66 Efektivne dubine nitriranja za uzorke s tretiranom površinom.....	57
Sl. 67 Trag trošenja nakon ispitivanja.....	58
Sl. 68 Tragovi trošenja a)Osnovno b)Plinski nitrirano c)Plazma d)TENIFER) e)PACVD.....	59

POPIS TABLICA

Tablica 1 Tumačenje ocjena tribološke kompatibilnosti materijala.....	8
Tablica 2 Tribološka kompatibilnost obzirom na kristalnu strukturu [3]	9
Tablica 3 Rezultati mjerenja progiba	12
Tablica 4 Tehničke karakteristike senzora	15
Tablica 5 Ovisnost stupnja disocijacije amonijaka o temperaturi procesa.....	26
Tablica 6 Kemijski sastav čelika 100Cr6	38
Tablica 7. Izmjereni progib opruge ovisan o sili savijanja	40
Tablica 8 Izmjerene vrijednosti parametara hrapavosti	43
Tablica 9 Statistički parametri faktora trenja za F 11N	51
Tablica 10 Statistički parametri faktora trenja za F 20N	51
Tablica 11 Porast faktora trenja ovisno o normalnoj sili (F_n) u odnosu prsten u osnovnom stanju opterećen sa $F_n=11N$	53
Tablica 12 Raspored mikrotvrdoće po presjeku za uzorak nitriran u plinu	54
Tablica 13 Raspored mikrotvrdoće po presjeku za uzorak nitriran u solnoj kupci TENIFER	54
Tablica 14 Raspored mikrotvrdoće po presjeku za uzorak za postupak PA CVD TiN	55
Tablica 15 Raspored mikrotvrdoće po presjeku za uzorak nitriran u plazmi.....	56
Tablica 16 Debljine trošenja za različite normalne sile	58

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m ²	Dodirna površina kod kontaktnih problema
a	m	Širina površine otiska kod kontaktnih pritisaka
b	m	Poluširina otiska
C	N/mm ²	Konstanta opruge
c	N/mm ²	Konstanta opruge
d _{sr}	m	Srednja vrijednost dijagonale kvadratne baze otiska
E	N/mm ²	Youngov modul elastičnosti
E'	N/mm ²	Reducirani modul elastičnosti
E _{A,B}	N/mm ²	Youngov modul elastičnosti za tijelo A i B
F _{gr}	N	Granična sila
F _n	N	Normalna sila
F _{pr}	N	Normalna komponenta opterećenja na površinu
F _s	N	Sila na savojnu oprugu
F _{tr}	N	Sila trenja
F ₁	N	Otpor na elastičnu deformaciju
F ₂	N	Otpor na plastičnu deformaciju
F ₃	N	Otpor na brazdanje
F ₄	N	Otpor na kidanje adhezijskih veza
G	N	Težina kotača
g	m/s ²	Gravitacijska konstanta
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
I	mm ⁴	Moment tromosti
L	m	Duljina
l	m	Duljina
m	kg	Masa utega
p	Pa	Tlak
p _{max}	Pa	Maksimalni pritisak
R _a	μm	Aritmetička sredina apsolutnih odstupanja profila od srednje linije
R _m	μm	Maksimalna udaljenost srednje linije do dna udubine
R _p	μm	Maksimalna udaljenost od srednje linije do vrha profila
R _q	μm	Srednja kvadratna vrijednost profila <i>p</i> u granicama referentne duljine
R _y	μm	Udaljenost između najviše i najniže točke unutar referentne duljine
R _z	μm	Srednja vrijednost apsolutnih vrijednosti visine 5 najviših izbočina i dubine 5 najdubljih udubina u granicama referentne duljine <i>l</i>
R _{ax}	m	Radijus zakrivljenosti

R_{bx}	m	Radijus zakrivljenosti
R_{ay}	m	Radijus zakrivljenosti
R_{by}	m	Radijus zakrivljenosti
R'	m	Radijus zakrivljenosti
r	m	Radijus
S	m	Položaj
S_{max}	m	Maksimalni položaj mete
S_{min}	m	Minimalni položaj mete
U	V	Napon
$U_{1,2}$	m	Pomak točke 1 ili 2
u	m	Pomak
$w_{c,b}$	m	Progib u točki c ili b
z	m	Udaljenost od površine na kojoj djeluje maksimalno posmično naprezanje

Grčke oznake

α	-	Nagib na mjestu djelovanja sile
μ	-	Faktor trenja
μ_s	-	Statički faktor trenja
μ_d	-	Dinamički faktor trenja
$\nu_{A,B}$	-	Poissonov koeficijent za tijelo A i B
τ_{max}	MPa	Maksimalno posmično naprezanje

SAŽETAK

U radu je provedeno ispitivanje trenja Block on ring metodom pomoću modernizirane verzije uređaja. Ispitni uzorci se bili tretirani različitim postupcima površinske obrade; nitriranju u plinu, solnoj kupci, plazmi te prevlačenju PACVD TiN prevlakom. Zadatak je bio odrediti kako različita stanja površine (različita toplinska obrada i površinska hrapavost) te različita normalna sila utječu na faktor trenja. Iz rezultata se moglo zaključiti kako je modernizirana metoda znatno pouzdanija od uobičajene. Najniže faktore trenja očekivano su ostvarili uzorak bez prevlake te uzorak prevučen PACVD TiN.

Ključne riječi: trošenje, prizma-prsten, nitriranje, faktor trenja, inženjerstvo površina

SUMMARY

This work deals with determination of friction coefficient with modified version of old ‘Block on Ring ‘ device which is used for wear tests. The specimens had different heat surface treatments ; nitriding in gas, nitriding in salt bath , nitriding in plasma and plasma assisted chemical vapour deposition. The mission was to determine how different surface conditions(different heat treatment and surface roughness) and different normal loads influence the friction coefficient. From the test results we can see that the modified method is more confident than standard version of wear test. The lowest friction coefficient had untreated and specimen coated with PACVD TiN.

Key words:friction, block on ring wear test , surface treatment , friction coefficient,

1. UVOD

Pojava trenja je praktički neizbježna u svakodnevnom životu i industrijskoj primjeni. Za određivanje iznosa i promjene faktora trenja postoji više međunarodnih normi (ASTM G-99, DIN 51813) [1]. Zbog opće prisutnosti i djelovanja sile trenja postoji više načina za određivanje faktora trenja, koji uzimaju u obzir različite kombinacije ispitnih uvjeta, gibanje elemenata tribopara, utjecaje maziva, temperature i dr.. Između raznovrsnih metoda ispitivanja faktora trenja i adhezijskog trošenja po jednostavnosti izvedbe i dobroj ponovljivosti ispitivanja ističe se metoda blok na prstenu.

Ispitivanja u radu provest će se na ležajnom prstenu izrađenom od materijala 100 Cr6 u pet različitih stanja ; osnovnom, nitriranom (u plinu, plazmi, solnoj kupci Tenifer) te prevučenom PACVD TiN prevlakom. U kliznom paru s prstenom koristit će se blok izrađen od nehrđajućeg čelika EN X5CrNi18-10 prevučen prevlakom PACVD TiCN.

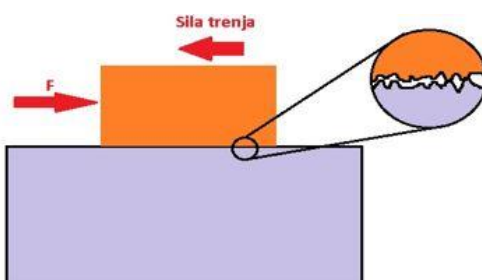
Ispitivanja će biti provedena u uvjetima suhog trenja za dva različita iznosa normalne sile: $F_1 = 11 \text{ N}$ i $F_2 = 20 \text{ N}$.

Na temelju provedenih ispitivanja predložit će se mjerno područje unutar kojeg je moguće koristiti metodu „blok na prstenu“ uz dobru ponovljivost uvjeta ispitivanja te preciznost i točnost mjerenja faktora trenja.

2. Trenje

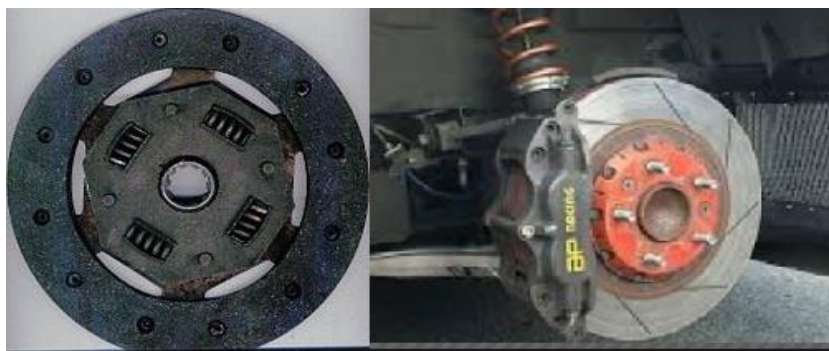
2.1. Pojava trenja u prirodi i tehnici

Trenje se prema DIN5281 definira kao otpor koji se javlja između površina nalijeganja dvaju tijela te se ili suprotstavlja njihovom međusobnom gibanju ili onemogućuje gibanje. Sila trenja djeluje tangencijalno na dodirnu površinu, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog kretanja (Sl. 1). Posljedice sile trenja su pojava trošenja i pretvorba mehaničkog rada u toplinu [1, 2].



Sl. 1 Sila trenja kao rezultat stanja površine

S aspekta prijenosa snage trenje je često nepoželjno jer generira gubitke energije zbog čega se smanjuje korisnost strojeva. Prema [2] 10 % potrošnje nafte posljedica je neželjenog trenja. S druge strane kad bi ga potpuno eliminirali uobičajene radnje poput hodanja ili paljenja vatre ne bi bili mogući. Kad trenje ne bi postojalo kretanje po raznim podlogama bilo bi istovjetno kretanju po ledu, a vatru ne bi bilo moguće upaliti pošto se usred trenja postižu visoke temperature potrebne za paljenje. Tipični primjeri korisne primjene pojave trenja u industriji jesu tarna spojka, koja pomoću trenja prenosi okretni moment s vratila motora na zamašnjak i pogonske kotače te kočnice koje pomoću trenja zaustavljaju kotače (Sl. 2).



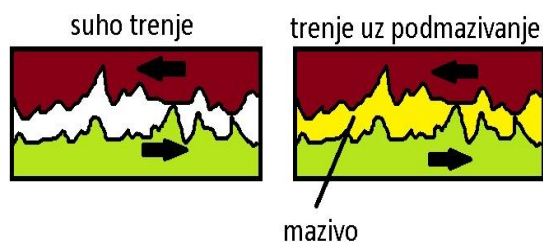
Sl. 2 Primjeri korisnog trenja; spojka i disk kočnice [4]

2.2. Vrste trenja

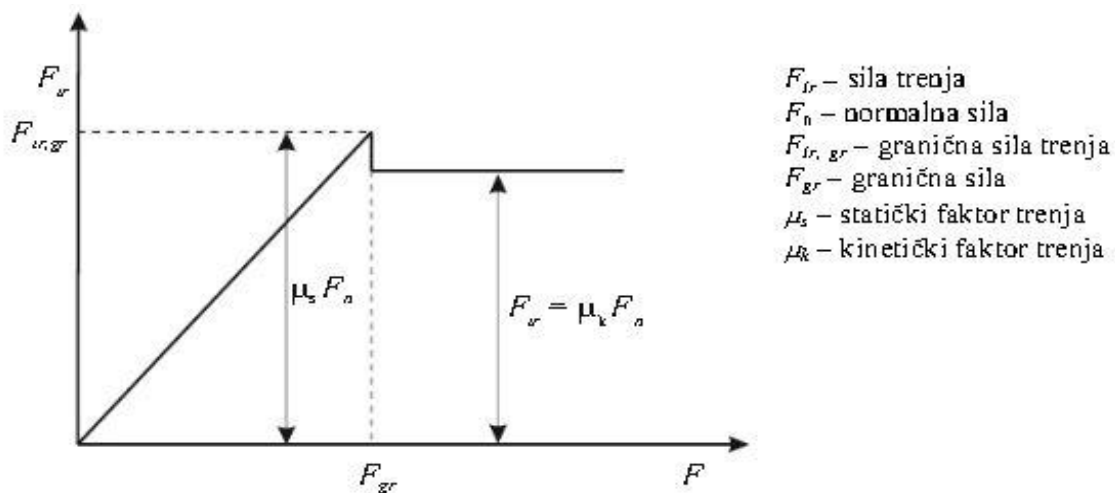
Prema agregatnom stanju osnovnog tijela/međutijela/protutijela razlikuje se :

- trenje između čvrstih površina (vanjsko trenje)
- trenje između dijelova fluida, odnosno krutog tijela i fluida

Obzirom na podmazivanje pojavljuje se suho trenje i trenje uz podmazivanje (Sl. 3).



Sl. 3 Shematski prikaz suhog i mokrog trenja



Sl. 4 Odnos statičkog i dinamičkog trenja [3]

Obzirom na gibanje trenje može biti statičko i dinamičko. Iz Sl. 4 vidljivo je kako je statičko trenje uvijek veće od dinamičkog. Za opis pojave i djelovanja trenja vrijede slijedeći zakoni trenja [3] ;

- Trenje je neovisno o površini elemenata u kontaktu
- Sila trenja je proporcionalna normalnoj sili
- Kinetičko trenje je neovisno o kliznoj brzini

Faktor trenje je omjer sile trenja i normalne sile (jednadžba (1)).

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_{pr}} \quad (1)$$

Gdje je:

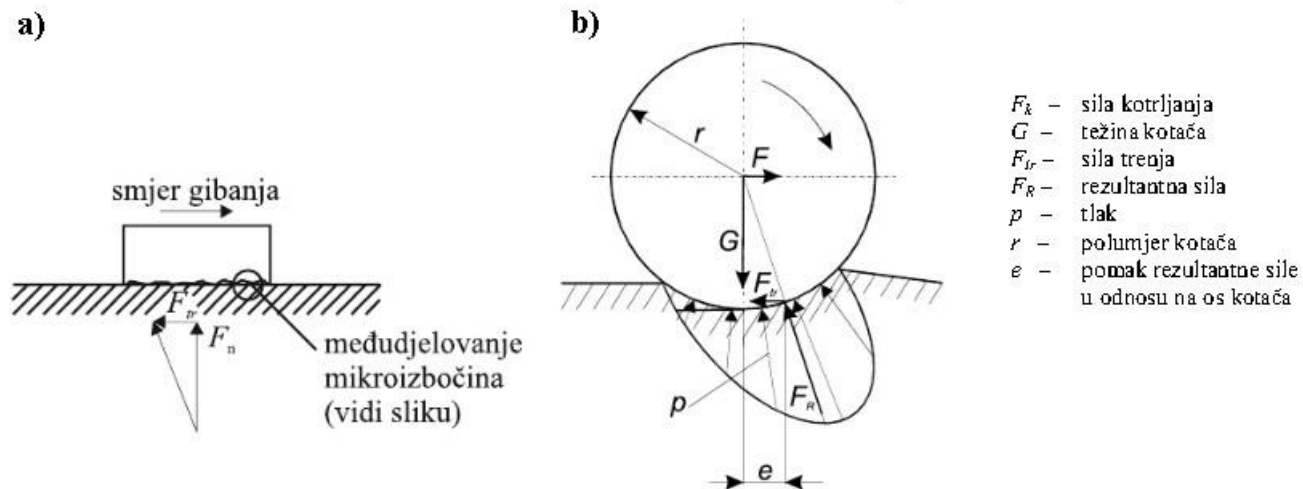
F_{tr} -iznos sile trenja u [N]

F_{pr} -normalna komponenta opterećenja na površinu [N]

Dinamičko trenje se može podijeliti na trenje klizanja, kotrljanja i valjanja

- Trenje klizanja - površine nalijeganja klize jedna po drugoj (npr. klizni ležaj, klizna vodilica kod alatnih strojeva).
- Trenje kotrljanja se pojavljuje kao otpor između dvaju ili više tijela u međusobnom kontaktu i kinematičkoj vezi. Ovo trenje je značajno manje od trenja klizanja jer zbog smanjene kontaktne površine izostaju pojave trošenja površina (brazdanje i adhezijske deformacije).
- Trenje valjanja

Razlika između trenja klizanja i valjanja prikazana je na Sl. 5.



Sl. 5 Trenje a) klizanja, b) kotrljanja [3]

$$F_{t,kl} = \sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4 \quad F_{t,valj} = \sum F_1 + \sum F_2$$

$$\begin{array}{ll} \sum F_1 - \text{otpor na elastičnu deformaciju} & \sum F_3 \text{ otpor na brazdanje} \\ \sum F_2 \text{ otpor na plastičnu deformaciju} & \sum F_4 \text{ otpor na kidanje adhezijskih veza} \end{array} \quad (2.a-b)$$

Utjecajni parametri na vrijednosti i promjenu faktora trenja jesu slijedeći [5] ;

- Hrapavost površine
- Materijal
- Prisustvo medija za podmazivanje
- Normalna sila koja djeluje na podlogu

3. Ispitivanje faktora trenja i otpornosti na adhezijsko trošenje

3.1. Tribo-sustav za ispitivanje faktora trenja

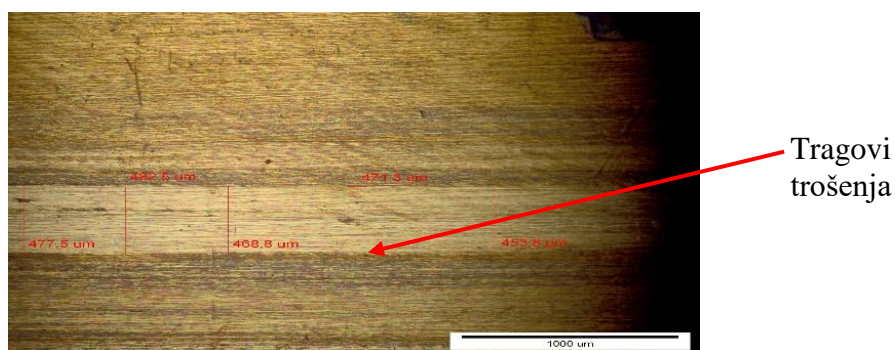
Tribološki sustav koji se koristi pri ispitivanju adhezijskog trošenja sastoji se od prstena i prizme prikazan je na Sl. 6.



Sl. 6 Tribo-sustav prsten prizma

Prsteni korišteni za ispitivanje adhezijskog trošenja block on ring metodom se tipično izrađuju iz središnjeg dijela ingota a materijal izrade je visokouglični čelik legiran kromom i molibdenom (100Cr6). Prizma je također čelična, a u eksperimentalnom dijelu rada je prevučena TiCN zbog čega se može promatrati kao element potpuno otporan na trošenje zbog toga što je sloj TiCN koji se nalazi na površini prizme znatno otporniji od površine prstena. Prizma se nalazi u posebnom držaču koji ravnomjerno tlači gornju površinu prizme. Prsten i prizma se nalaze u nekonformnom kontaktu te se dodiruju se u liniji. Dimenzije dodirne površine i iznosi naprezanja računaju se pomoću Hertzove teorije kontaktnih pritisaka.

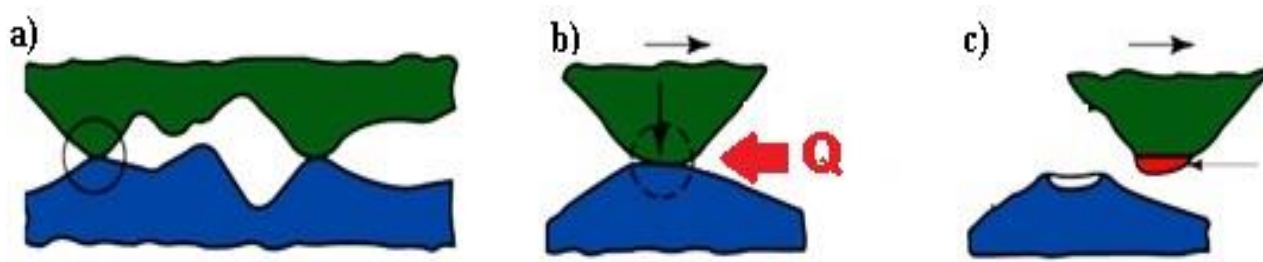
Prsten u tijeku ispitivanja rotira brzinom 1,5 okr/min dok ga istovremeno pritišće prizma. U ispitivanjima u radu izabrana je prizma tvrdoće više od tvrdoće prstena kako bi se mogao proizvesti trag trošenja na površinski modificiranom prstenu (Sl. 7). Obzirom na to da se ne koriste maziva proces se odvija u uvjetima suhog trenja.



Sl. 7 Prikaz određivanja širine traga trošenja na prstenu s PACVD prevlakom TiN

3.2. Adhezijsko trošenje

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela usred dinamičkog dodira s drugim tijelom, fluidom i/ili česticama. Većina autora razlikuje osnovne četiri vrste trošenja: adheziju, abraziju, umor površine i tribokoroziju. U radu je ispitana otpornost na adhezijsko trošenje. Riječ kojom se najbolje opisuje proces adhezije je mikrozavarivanje. Po definiciji adhezijsko trošenje je trošenje pri kojem dolazi do mikrozavarivanja jednog materijala na drugi pri kontaktu. Proces se može opisati jediničnim događajima prikazanim na Sl. 8.



Sl. 8 Shematski prikaz procesa adhezije kroz jedinične događaje [6]

Da bi se razumio proces adhezije treba uzeti u obzir da su realne površine objekata u dodiru pune mikroneravnina. One se ne dodiruju cijelom površinom već na mjestima izbočenja koja se nazivaju asperitne veze (Sl. 8a)

Povećanjem opterećenja zbog male dodirne površine naprezanja se lokaliziraju i poprimaju visoke iznose zbog čega se može prijeći iz elastičnog u plastično područje (Sl. 8b). Ukoliko postoji relativno gibanje dvaju tijela javlja se također sila trenja koja uzrokuje pretvorbu mehaničke energije u toplinu (Q) uz povišenje temperature te pojavu mikrozavarivanja i naljepljivanja manje otpornog materijala na otporniji materijal [6, 7].

3.3. Otpornost na adhezijsko trošenje

Jakost uspostavljenih adhezijskih veza među različitim materijalima utječe na sklonost stvaranja mikrozavarenih spojeva i adhezijskog trošenja. U raznim priručnicima mogu se lako pronaći rezultati interakcija među brojnim čistim metalima na temelju čega se predviđaju adhezijska svojstva potencijalnog tribo-para. Na Sl. 9 prikazana je Rabinowitz-ova karta tribološke kompatibilnosti materijala za razne kombinacije. Ocjene se tumače sukladno prema vrijednostima prikazanim u Tablica 1.

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sb	Pb
Ir				2	2				1	2	2	1	1	4	2	1	1	1	1
Pb	3	3	4	4	4	4	4	1	1	1	4	3	2	4	4	2	2	1	
Sb	2		4	2	2	3	2	1	2	1	2	1	1	3	2	3	1		
Cd			2	2	3	3		1	1	2	2	1	1	4	1	1			
Mg		2		2	3	3	3		1	3	1	1	1	1	1	2			
Zn		2	1	1	1	1	3	1	3	2	1	1	1	1					
Al	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1						
Ag	4	3	4	4	4	4	3	1	2	1	2	1							
Au	1	2	1	2	1	1		1	1	2	1								
Cu	3	4	4	1	1	2	3	1	1	2									
Ti	1	1	1	2	1	1	1	1	1										
Zr	2	1	2	1	2	3	1	2											
Pt	1	1	1	1	1	1	1												
Nb	1	1	1	1	1	1													
Fe	1	1	1	1	1														
Ni	1	1	1	1															
Co	1	1	1																
Cr	1	1																	
Mo	1																		

Sl. 9 Rabinowitz-ova karta tribološke kompatibilnosti materijala [3]

U Tablica 1 su prikazane ocjene koje mogu postići razni parovi materijala obzbirom na tribo-kompatibilnost . Ocjena varira od ocijene 1 koja karakterizira najgoru kompatibilnost (jer je su u tom slučaju adhezijske veze najjače) do ocijene 4 koja predstavlja najbolju kompatibilnost gdje su adhezijske veze za odabrani par najslabije .

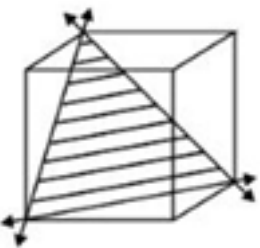
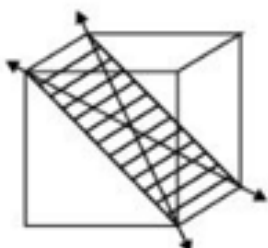
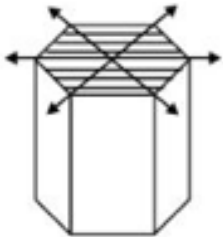
Tablica 1 Tumačenje ocjena tribološke kompatibilnosti materijala

KOMPATIBILNOST	OCJENA	ADHEZIJA
najbolja	4	najslabija
dobra	3	slaba
loša	2	jaka
najlošija	1	najjača

Obzirom na vrstu kristalne rešetke i broj kliznih ravnina materijali se mogu ocijeniti kako je prikazano u Tablica 2. Iz tablice se vidi kako su materijali s manjim brojem kliznih ravnina u kristalnoj rešetci otporniji na adhezijsko trošenje. Ovakvim tablicama su često obuhvaćeni samo čisti metali te služe samo za okvirnu ocjenu tribološke kompatibilnosti. Realni tribo-sustav treba podvrgnuti tribološkim ispitivanjima nakon čega će se eksperimentalno utvrditi prikladnost tribo-parova za rad. U literaturi se navodi kako je nitriranje posebno pogodan postupak za povećanje otpornosti na adhezijsko trošenje. U eksperimentalnom dijelu rada uzorci od istog

materijala će se podvrgnuti nitriranju (plinskom, u solnoj kupci i plazmi) i prevlačenju postupkom PACVD TiN te će se usporediti sa ispitnim uzorkom u polaznom stanju.

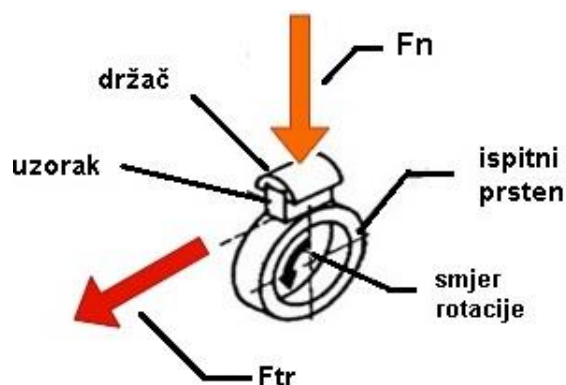
Tablica 2 Tribološka kompatibilnost obzirom na kristalnu strukturu [3]

Rešetka	Tip rešetke	Element	Klizne ravnine	Klizni pravci	Broj kliznih sustava	Kompatibilnost
	FCC	Cu Al Ni Pb Au Ag	$4\{111\}$	$3\{110\}$	$4 \cdot 3 = 12$	1
	BCC		$6\{110\}$	$2\{111\}$	$6 \cdot 2 = 12$	2
	HCP		$1\{0001\}$	$3\{1120\}$	$1 \cdot 3 = 3$	4

Ocjene tribološke kompatibilnosti u Tablica 2 su opisane sukladno ocjenama u Tablica 1.

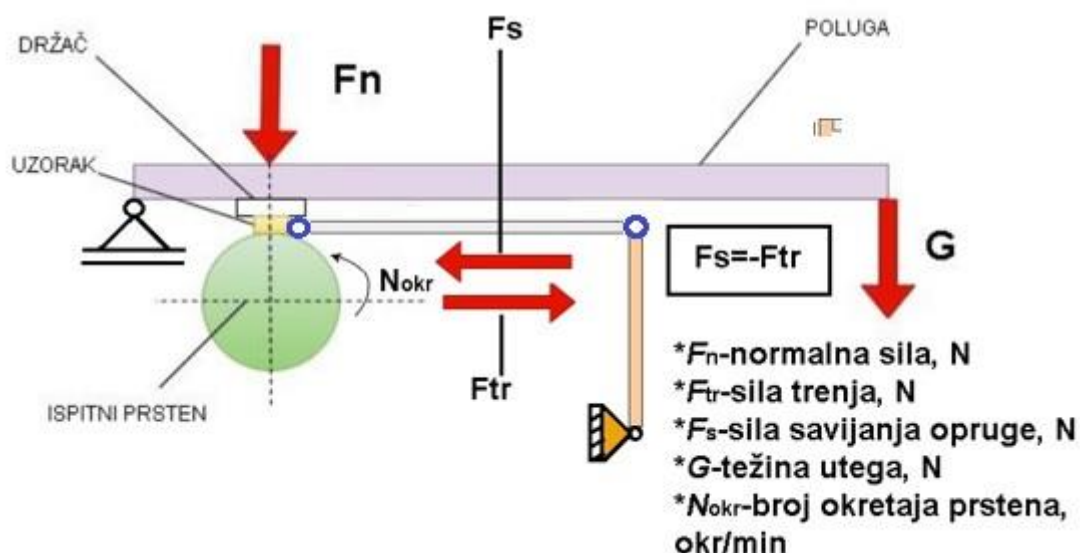
3.4. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje metodom „Block on Ring“

Ispitivanje prizma na prstenu odnosno block on ring je definirano normom ASTM G77 te se njome ispituje otpornost materijala na adhezijsko trošenje. Princip rada sustava prikazan je na. Sl. 10 i Sl. 11 .



Sl. 10 Prsten i prizma

Ispitni uzorak u obliku prizme se postavlja u posebni držač (Sl. 10) nakon čega se postavi uteg koji će preko mehanizma s polugom ostvariti normalnu silu F_n koja djeluje na ispitni uzorak (Sl. 11) Ispitni uzorak je u kontakt s rotirajućim prstenom koji će tokom ispitivanja rotirati zadanom brzinom. Ispitni prsten se najčešće radi od materijala otpornijih na trošenje pa se tako tijekom rotacije više troši ispitni uzorak postavljen u držač.



Sl. 11 Shema uređaja Block on ring

Prvi korak u ispitivanju je kalibracija opruge. U eksperimentu se koristi savojna opruga s linearnom karakteristikom. Prvo je potrebno odrediti progibe uzrokovane silom preko dinamometra. Svrha kalibracije je određivanje konstante opruge. Taj korak jako bitan zato što je opruga mehanizmom vezana za držač s uzorkom pa se sila trenja koja se javlja na površini uzorka dalje prenosi na oprugu savijajući ju. Tako je dakle sila trenja F_{tr} jednaka sili savijanja opruge F_s . Sila trenja se ne mjeri direktno tijekom ispitivanja već se pomoću mjerne ure detektira progib opruge u . Tada se koristeći Hooke-ov zakon lako izračuna faktor trenja ;

$$\mu = \frac{c * u}{m * g * 5} \quad (3)$$

Gdje je ;

c -konstanta opruge [N/mm]

u -pomak koji na mjernoj uri uzrokuje opruga (progib) [mm]

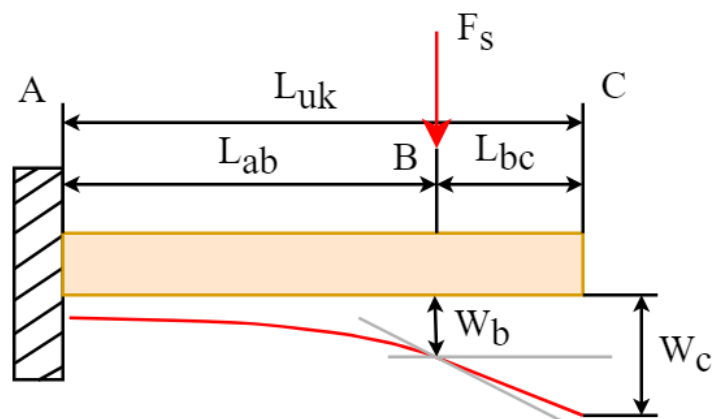
m -masa utega koji preko poluge uzrokuje normalnu silu [kg]

g -gravitacijska konstanta

Nedostatak ovakvog načina mjerenja je što može biti iscrpljujući, te je teško precizno očitati pomak jer se vrlo brzo mijenja progib opruge i teško je točno i precizno očitati njen položaj (Sl. 18a). Zato se postupak pokušao unaprijediti korištenjem induktivnog senzora umjesto mjerne ure što omogućava digitalni zapis signala.

3.5. Usporedba izmjerenog i proračunskog progiba opruge

Opruga koja titra za vrijeme ispitivanja adhezijskog trošenja metodom Blok na prstenu može se shvatiti kao ukliještena konzola što je prikazano na Sl. 12



Sl. 12 Prikaz progiba svojne opruge

Na savojnu oprugu djeluje sila trenja F_s ($F_s = F_{tr}$) koju se nastoji što preciznije i točnije odrediti i praktički zanemariva sila povratne opruge koja vraća ticalo mjerne ure u početni položaj. U ovom proračunu će se u obzir uzeti samo djelovanje sile trenja F_{tr} koja je uobičajeno za dva reda veličine veća od sile povratne opruge mjerne ure. To se može lako provjeriti usporedbom izmjerenih vrijednosti progiba i analitičkih vrijednosti. Na mjestu djelovanja sile F_s progib i nagib se računaju pomoću jednadžbi (4) i (5) preuzetih iz [8]:

$$w = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{Fl^2}{2EI} \quad (5)$$

Uvrštavanjem sila koje su se koristile pri kalibraciji opruge dobiju se analitičke vrijednosti progiba prikazane u Tablica 3. Ostatak konzole se zakreće kao kruto tijelo pa se tako pomoću trigonometrijskih identiteta računa prirast progiba na dijelu BC te se pridodaje progibu u točki B da bi se dobio ukupni progib na mjernom mjestu C (jednadžba (6)).

$$w_c = w_b + \alpha_B * (L_{uk} - L_{ab}) \quad (6)$$

U Tablica 3 se nalaze progibi izmjereni dinamometrom te progibi uzrokovani jednakom silom prema analitičkom proračunu. Usporedbom analitičkog rješenja sa izmjerenim vrijednostima može se zaključiti sljedeće:

- Modelom savijanja konzole može se opisati zadani problem
- Konstanta opruge je precizno određena eksperimentalnim ispitivanjem
- Utjecaj povratne opruge na ukupan progib je zanemariv.

Tablica 3 Rezultati mjerenja progiba

Sila [N]	Izmjereno mjernom urom[mm]	Analitički[mm]	Greška
10	1.3	1.67	-28%
20	3.85	3.33	15%
30	5.55	5	11%
40	7.05	6.67	6%
50	8.1	8.33	2%

Uspoređivanjem rezultata iz Tablica 3 vidi se kako se analitički izraz na zadovoljavajući način može opisati realno savijanje koje se očitava na mjernoj uri prilikom eksperimenta. Zanimljivo je primijetiti kako je manja razlika između analitičkih i izmjerenih vrijednosti pri većim silama (pri sili od 50 N greška je 2 %) zbog čega će rezultat biti pouzdaniji pri višim iznosima F_{tr} .

4. Modernizacije uređaja za ispitivanje metodom Prizme na prstenu

Temeljni princip na temelju kojeg uređaj za adhezijsko trošenje radi ostaje isti i temelji se na mjerenju progiba savojne opruge tijekom vibriranja uzrokovanog silom trenja koja se javlja prilikom trošenja podloga u kontaktu. Glavne izmjene se sastoje u sljedećem:

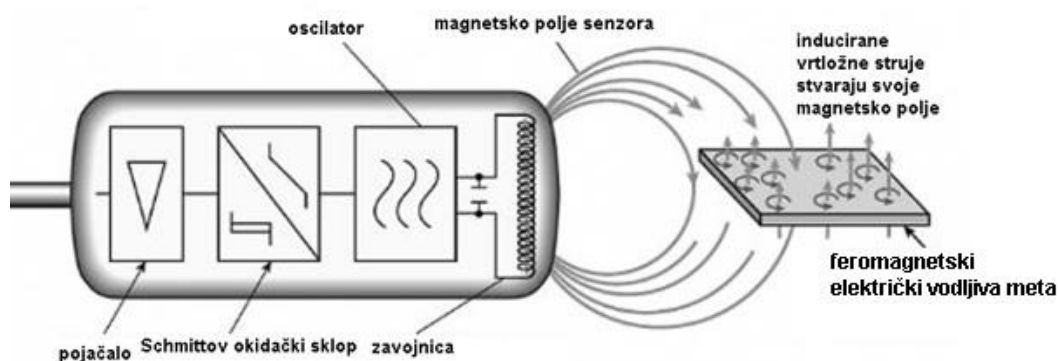
- Upotrijebljen induktivni senzor umjesto mjerne ure
- Materijal trošenja je prsten dok je prizma izrađena od čelika prevučenog TiCN koji je čini znatno tvrđom i otpornom na trošenja

Za uspješno korištenje senzora u sklopu postojeće aparature također su napravljene sljedeće preinake:

- 1) Izrađeno je kućište za induktivni senzor.
- 2) Izrada ticala s metom od električki vodljivog materijala
- 3) Odmicanje prihвата za ticalo kako bi induktivni senzor mogao stati na potrebnu početnu poziciju.

4.1. Izbor induktivnog senzora

Princip rada induksijskog senzora temelji se na mjerenju promjene magnetskog polja unutar senzora koji uzrokuje vanjsko magnetsko polje uzrokovano vrtložnim strujama na vodljivoj meti. Senzor stvara vlastito magnetsko polje na koje će djelovati meta svojim magnetskim poljem (uzrokovano vrtložnim strujama) svojim približavanjem / udaljavanjem što se očituje u promjeni induktiviteta zavojnice. Shema rada induksijskog senzora prikazana je na Sl. 13.



Sl. 13 Princip rada induktivnog senzora [9]

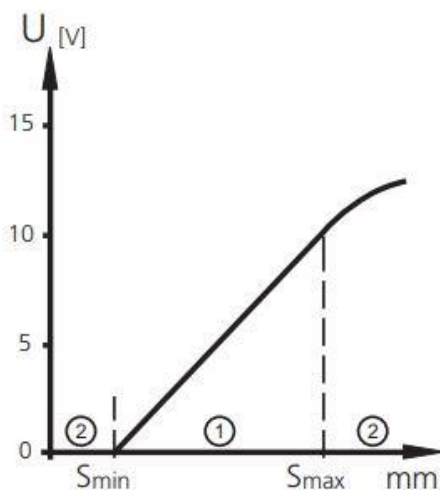
Za izbor senzora su uzeti u razmatranje slijedeći parametri:

1. Mjerno područje
2. Osjetljivost
3. Greška

Osjetljivost standardne mjerne ure je 0,1 mm a modernizacijom se želi postići slična ili jednaka osjetljivost. Iskustveno je određeno da progibi tijekom eksperimenta ne prelaze 10 mm pa je to određeno kao gornja granica. Greška mora biti ispod 5 % kako bi se mogla provesti pouzdana mjerenja. Za detekciju je odabran indukcijski senzor trgovačkog naziva II5917 tvrtke IFM (Sl. 14), dok je karakteristika izlaznog signala prikazana je na Sl. 15.



Sl. 14 Indukcijski senzor IFM II5917



Sl. 15 Karakteristika izlaznog napona senzora ovisno o udaljenosti feromagnetske „mete“ [10]

Točka S_{\min} predstavlja udaljenost mete od senzora kod koje se meta nalazi u najmanjem operativnom dometu. S_{\max} predstavlja najveću udaljenost na kojoj još uvijek senzor može detektirati metu. Kad je meta van radnog područja LED lampica to signalizira treperenjem. Na Sl. 15 se vidi kako je unutar radnog područja (između S_{\min} i S_{\max}) senzora linearan odnos između napona i položaja. Konstanta senzora iznosi u tom području iznosi 1,111 V/mm. U Tablica 4 su prikazani tehničke karakteristike senzora.

Tablica 4 Tehničke karakteristike senzora

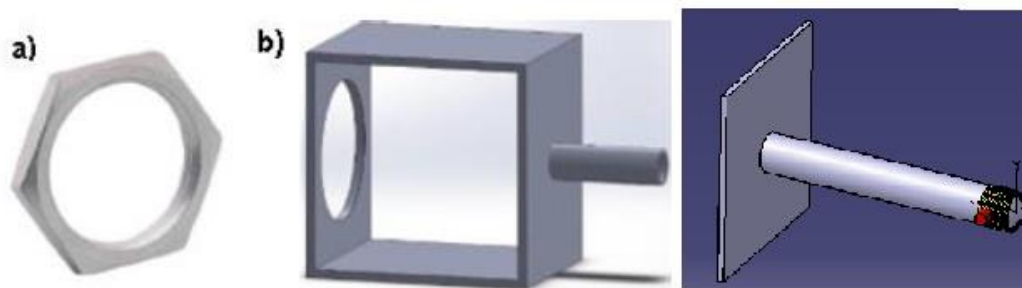
Područje primjene [mm]	Osjetljivost	greška	Veličina [mm]	Masa [g]	Vrijeme reagiranja [μs]
1-10	0,1 mm	3%	M30x1.5	151	<10

Senzor daje analogni izlazni signal raspona 0 do 10 V ovisno o udaljenosti mete. Točnost mjerenja također ovisi o materijalu mete a pošto je ovom slučaju materijal mete čelik korekturni faktor je 1 odnosno greška je minimalna. Temperaturni raspon na kojem senzor radi je -25 do +80 C što ga čini primjenjivim u vlažnim i prašnjavim uvjetima. Elektroničke komponente induktivnog senzora nužne za pravilan rad i očitavanje prikazane su na Sl. 16



Sl. 16 Prikaz elektroničkih komponenti uređaja [10]

Mehanički dijelovi senzora koje su nužni za pozicioniranje induktivnog senzora su matica M30 sa unutarnjim navojem, kućište s zavarenom vodilicom za ticalo i ticalo s oprugom i zatikom.

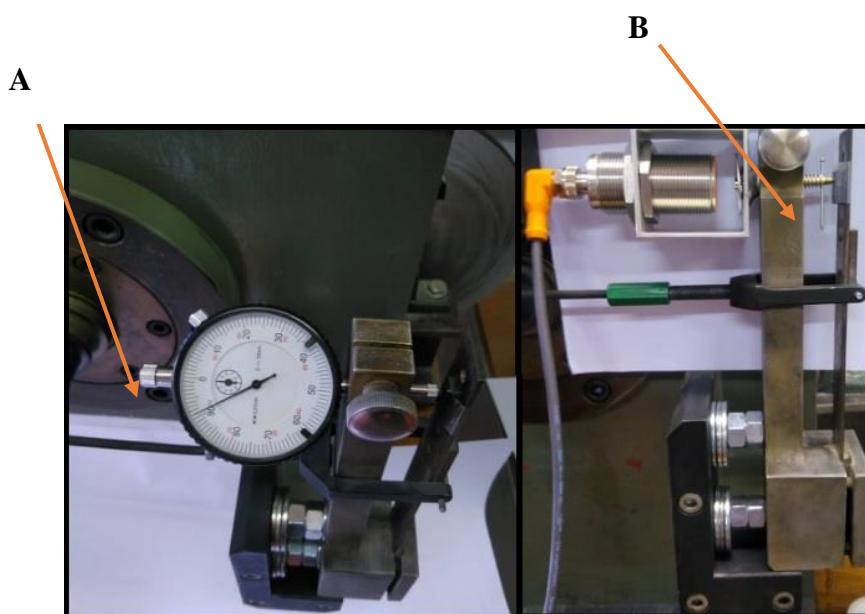


Sl. 17 Mehanički dijelovi sklopa senzora [10] : a) matica za podešavanje udaljenosti, b) kućište senzora, c) ticalo

Mjerni krug se sastoji od

- Mete s ticalom
- Induktivnog senzora IFMII5917
- Napajanja senzor
- Digitalnog WiFi osciloskopa
- Računala

Na Sl. 18 se vidi kako je jedan element (mjerna ura Sl. 18a) zamijenjen sklopom od više dijelova u moderniziranoj verziji uređaja. Modernizirana varijanta se čini kompliciranija jer se sastoji od više dijelova koje je potrebno propisno sastaviti i povezati sa računalom, no trud je isplativ jer su rezultati mjerenja znatno kvalitetniji.



Sl. 18 Očitanje pomaka opruge: a) pomoću mjerne ure (A), b) modernizirana varijanta s primjenom induktivnog senzora (B)

4.2. Točnost i preciznost mjerenja

Važne definicije iz područja mjerenja te vrste pogrešaka su dane u nastavku [11] ;

Mjerenje je proces eksperimentalnoga dobivanja jedne ili više vrijednosti veličine koje se mogu razumno pripisati veličini .

Mjerni rezultat (rezultat mjerenja) je skup vrijednosti veličine koje se pripisuju mjerenoj veličini zajedno sa svim drugim dostupnim bitnim podacima .

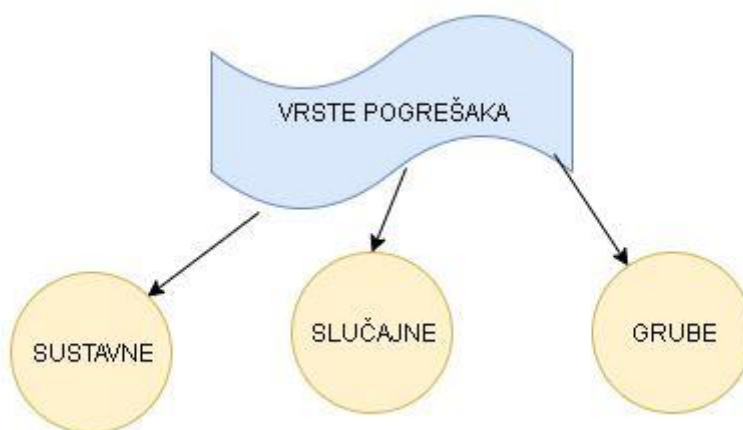
Mjerna nesigurnost je parametar koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini .

Mjerni sustav je skup od jednog ili više mjerila i često drugih uređaja prilagođen da daje podatke koji se upotrebljavaju za dobivanje izmjerenih vrijednosti veličine specificirane vrste u specificiranim intervalima veličina .

Mjerni postupak je podroban opis mjerenja u skladu s jednim ili više mjernih načela i danom mjernom metodom, na temelju mjernog modela i uključujući svaki izračun kako bi se dobio mjerni rezultat .

Pogreška mjerenja je razlika između izmjerene vrijednosti veličine i referentne vrijednosti veličine . Vrste pogrešaka prikazane su na Sl. 19 .

Sustavne pogreške u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine ostaju stabilne ili se mijenjaju na predvidiv način. Nastaju kao posljedica neodgovarajuće metode mjerenja, loše konstrukcije, deformacija i istrošenosti mjernih uređaja što dovodi do netočnosti rezultata mjerenja [11]



Sl. 19 Vrste pogrešaka

Slučajne pogreške u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine mijenjaju se na nepredvidiv način. U literaturi ih je moguće naći i pod izrazom neodredljive pogreške. Takve pogreške, kao što i sam naziv govori, ne mogu se prepoznati ni odrediti pa se iz istih razloga ne mogu ni otkloniti [11].

Grube pogreške u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine značajno odstupaju u odnosu na ostale rezultate. Nastaju nepažnjom mjeritelja, primjenom neodgovarajuće mjerne opreme ili neodgovarajuće metode mjerenja, korištenjem neispravnog mjernog instrumenta, očitavanjem rezultata na pogrešnoj mjernoj skali ili očitavanjem krive vrijednosti, izostavljenom znamenkom prilikom očitavanja sa skale i sl. Takve greške daju netočan rezultat koji se izbacuje iz analize te se mjerenje ponavlja na ispravan način. Rezultati mjerenja koji sadrže grube greške značajno odstupaju od ostalih rezultata, odnosno moguće ih je lako primijetiti [11].

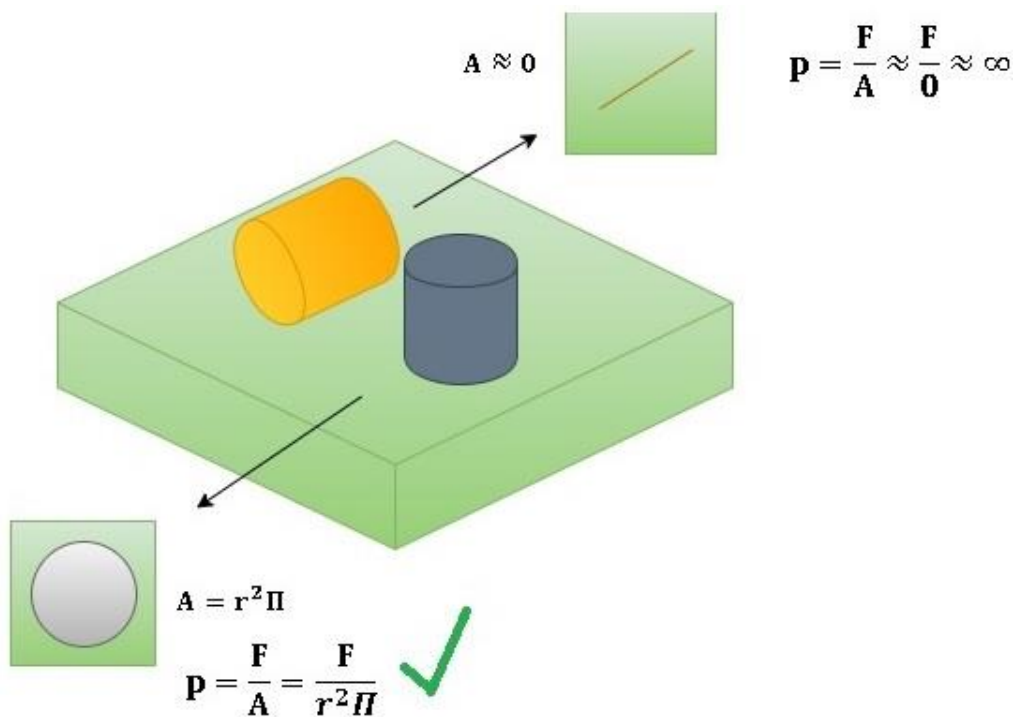
Mjerna preciznost je bliskost slaganja između izmjerenih vrijednosti veličine dobivenih ponovljenim mjerenjima na istim ili sličnim predmetima pod utvrđenim uvjetima. Utvrđeni uvjeti mogu podrazumijevati uvjete obnovljivosti, uvjete ponovljivosti, uvjete međupreciznosti mjerenja. Mjerna preciznost obično se izražava brojčano mjerama nepreciznosti, kao što su standardno odstupanje, varijanca ili koeficijent promjene pod utvrđenim mjernim uvjetima. (Sl. 20) [11].



Sl. 20 Prikaz odnosa preciznosti i točnosti [5]

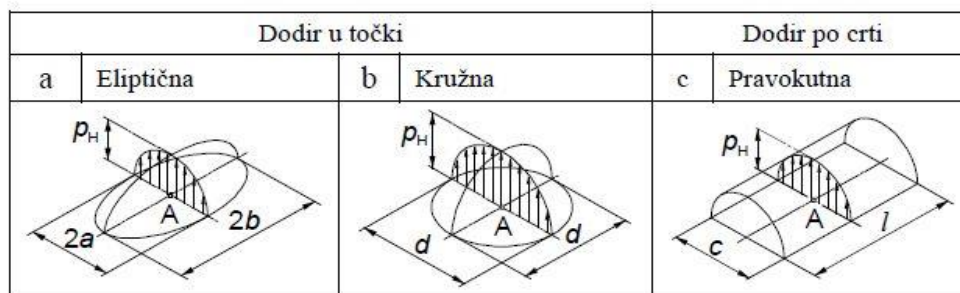
5. Kontaktna naprezanja

Govoreći o kontaktnim napreznjima misli se na napreznja koja se javljaju na mjestima dodira dvaju ili više tijela koji se nalaze u nekonformnom kontaktu. Stoga je bitno razlikovati konformni i nekonformni kontakt (Sl. 21). Kod konformnog kontakta površina dodira je usporediva s dimenzijama samog tijela. Primjeri su valjak položen na bazom na ravnu podlogu ili osovina u ležaju. Kod nekonformnog dodira površina dodira je znatno manja obzirom na cjelokupne dimenzije tijela (primjer je valjak plaštom položen na ravnu podlogu) [12].



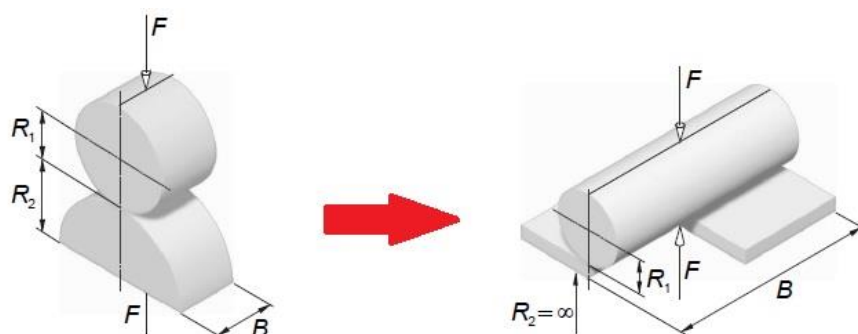
Sl. 21 Pojava kontaktnih pritisaka dvaju valjaka i ravne površine

Dodirna površina dvaju tijela kod nekonformnog kontakta može biti točka ili linija. Obzirom na to da je napreznje omjer sile F i površine A , u ovom slučaju napreznje poprima beskonačno veliku vrijednost koju nije moguće izračunati u sklopu jednadžbi Nauke o čvrstoći. U stvarnosti će ipak zbog elastičnosti materijala doći do deformacije zbog čega točka ili linija postaju površine. Točka postaje kružnica ili elipsa dok se linija pretvara u pravokutnu površinu. Tipične dodirne površine prikazane su na Sl. 22

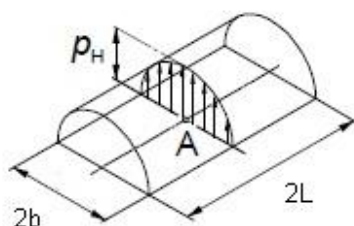


Sl. 22 Dodirne površine i raspodjela Hertz-ovog pritiska za dodir tijela u točki i liniji [13]

Kontaktne naprezanja za tribo- sustav prsten prizma mogu se računati koristeći model Hertz-ovog kontakta između 2 valjka. Kao što se vidi na Sl. 23 površina prizme se može promatrati kao valjak sa beskonačno velikim radijusom zakrivljenosti [10]. Dodir prijeđe u površinski u obliku pravokutnika s rasporedom naprezanja prikazanim na Sl. 24.



Sl. 23 Prikaz kontaktnog modela ravnina cilindar kao posebni slučaj kontaktnog modela cilindar-cilindar [13]



Sl. 24 Dodirna površina i kontaktno naprezanje za vrijeme djelovanja sile F za slučaj dodira u liniji [13]

Za 2D otisak prema [12] vrijedi relacija (7);

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{aX}} + \frac{1}{R_{bX}} + \frac{1}{R_{aY}} + \frac{1}{R_{bY}} \quad (7)$$

U ovom slučaju vrijedi (8):

$$\frac{1}{R_{bX}} = \infty \quad \frac{1}{R_{aY}} = \infty \quad \frac{1}{R_{bY}} = \infty \quad (8)$$

Uvrštavanjem iznosa vanjskog radijusa prstena $R=35\text{mm}$ i gore navedenih relacija u jednadžbu za izračun reduciranog radijusa zakrivljenosti dobije se iznos prikazan jednadžbom (9):

$$\frac{1}{R'} = 28.571428 \text{ m} \quad R' = 0.035 \quad (9)$$

Reducirani modul elastičnosti za dodir između dva tijela se računa prema izrazu (10).

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B} \right] \quad (10)$$

U slučaju kad su oba tijela od istog materijala izraz (10) se može pojednostavniti čime dobijemo jednadžbu (11):

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (11)$$

Karakteristike korištenog čelika u tribo-sustavu jesu slijedeće

$$E=210 \text{ GPa}$$

$$\nu=0,3$$

Kad se uvrste ti parametri u jednadžbu iznad reducirani modul elastičnosti iznosi:

$$E'=231 \text{ GPa.}$$

Poluširina otiska se računa prema izrazu (12).

$$b = \sqrt{\frac{4 * F * R'}{\pi * L * E'}} \quad (12)$$

Uvrštavanja svih parametara dobije vrijednost poluširine otiska:

$$b = 0.015811322 \text{ mm.}$$

Maksimalni pritisak se računa prema jednadžbi (13):

$$p_{\max} = \frac{F}{\pi * L * E'} \quad (13)$$

Uvrštavanjem dolje navedenih vrijednosti u izraz (13):

$$F=11 \text{ N}$$

$$L=0,0085 \text{ m}$$

$$E'=231 \text{ GPa}$$

dobije se vrijednost maksimalnog pritiska:

$$p_{\max} = 26 \text{ Mpa}$$

Maksimalno posmično naprezanje τ_{\max} se računa prema izrazu (14)

$$\tau_{\max} = 0.304 * p_{\max} \quad (14)$$

Uvrštavanjem $p_{\max} = 26 \text{ MPa}$ dobije se

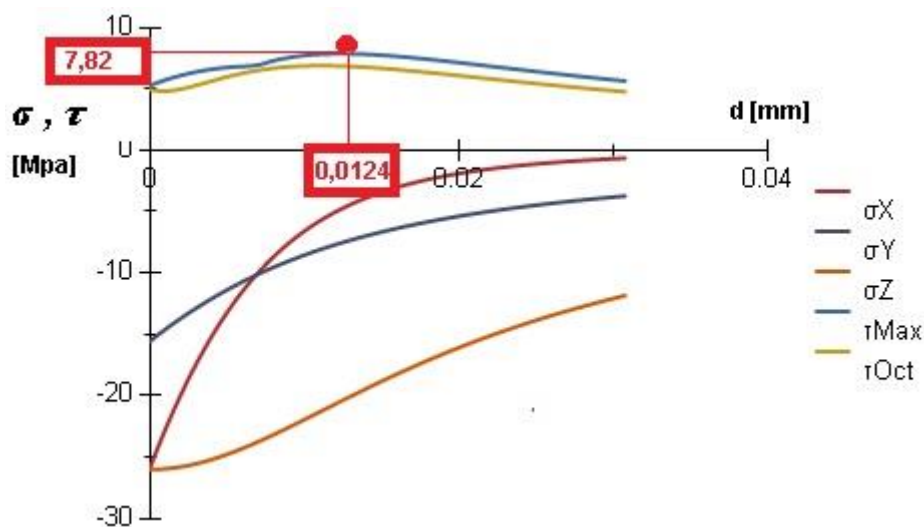
$$\tau_{\max} = 7.924 \text{ Mpa}$$

Udaljenost od površine na kojoj djeluje maksimalno posmično naprezanje se računa prema izrazu (15).

$$z = 0.786 * b \quad (15)$$

Za navedeni slučaj maksimalno posmično naprezanje djeluje na sljedećoj udaljenosti od ruba

$$z = 0.0124 \text{ mm}$$

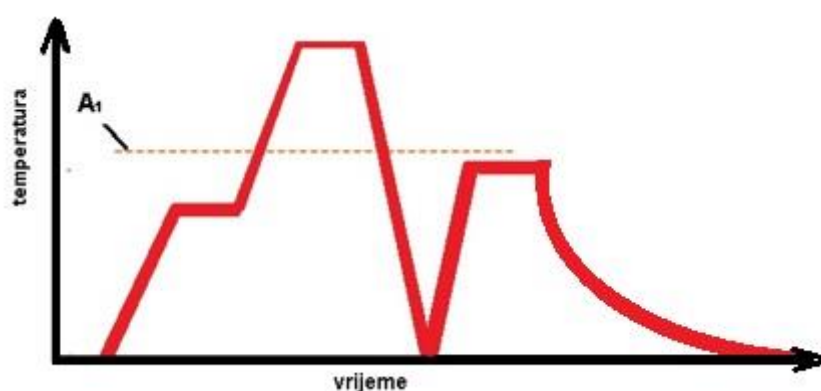


Sl. 25 Raspored naprezanja obzirom na udaljenost od površine

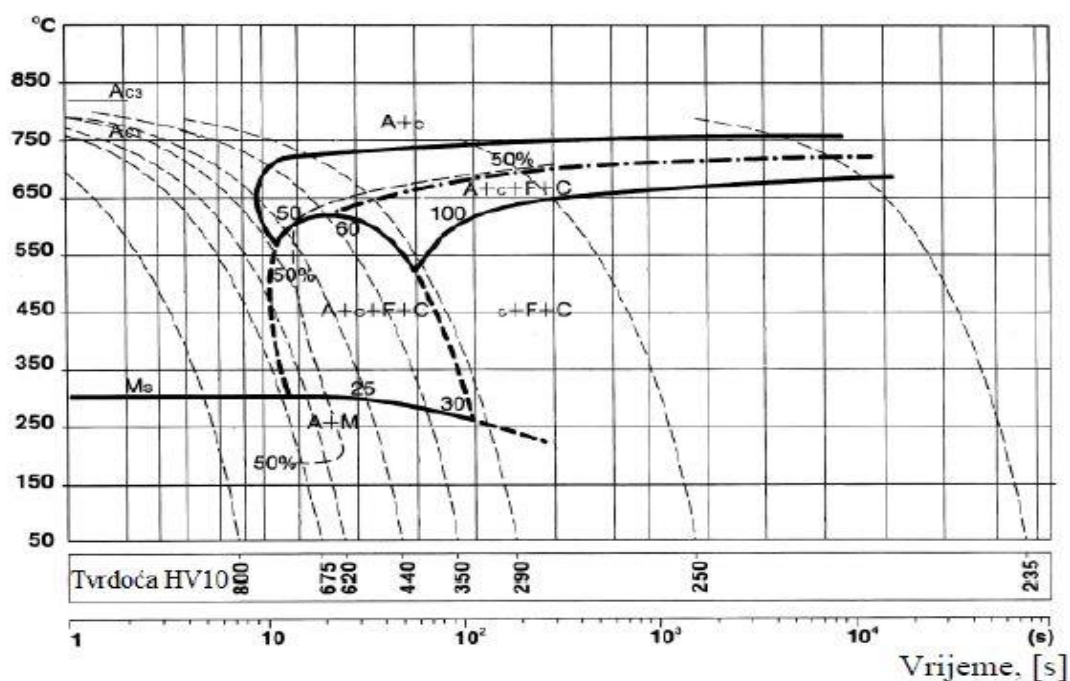
Na Sl. 25 se vidi kako maksimalno posmično naprezanje u iznosu od 7,82 MPa djeluje na dubini od 0,0124 mm (12,4 μm). Ova dubina će se kasnije usporediti s debljinom zone spojeva i efektivnom dubinom nitriranja.

6. Primjena i toplinska obrada čelika 100 Cr6

Glavna karakteristika kemijskog sastava ove skupine alatnih čelika je da sadrže 1-1,5% ugljika i 0,5-1,5% kroma te se najčešće koriste za izradu alata i kotrljajućih ležajeva (prstena, kuglica, valjaka i sl.). Relativno niski udio kroma u ovim čelicima omogućava stvaranje cementita sastava $(Fe,Cr)_3C$, ali ne i nastanak posebnih karbida. Niskolegirani Cr-čelici se nisko popuštaju ($150-250\text{ }^{\circ}C$) pa se ne stvaraju karbidi posebnog Cr-tipa nego se otpornost na trošenje postiže karbidima $Fe_{2,4}C$. Niskolegirani Cr-čelici su nadeutektoidni pa nakon kaljenja postižu mikrostrukturu koja se sastoji od martenzita, karbida $(Fe,Cr)_3C$ i zaostalog austenita. Tipična toplinska obrada čelika 100Cr6 prikazana je na Sl. 26 i Sl. 27.



Sl. 26 Dijagram postupka poboljšavanja čelika 100Cr6

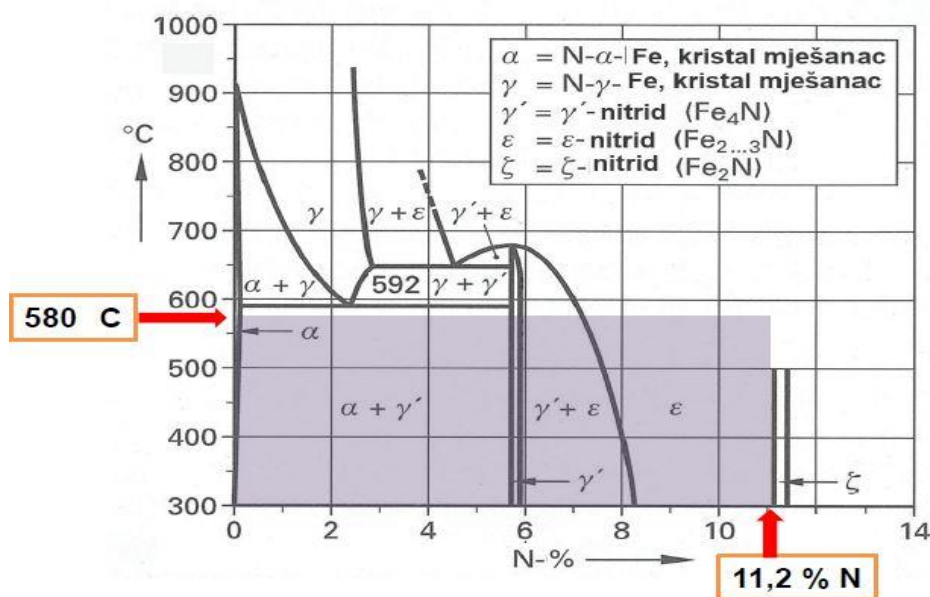


Sl. 27 TTT 100Cr6

6.1. Difuzijske pojave pri nitriranju

Jedna od glavnih ideja inženjerstva površina je postizanje svojstava površine različitih svojstvima koje ima jezgra. Postupci kojima se intervenira na površinu možemo podijeliti na postupke prevlačenja i postupke modificiranja. Kod prevlačenja površinski sloj se stvara na polaznoj površini dok se kod postupaka modificiranja površinski sloj stvara od polazne površine prema unutrašnjosti materijala.

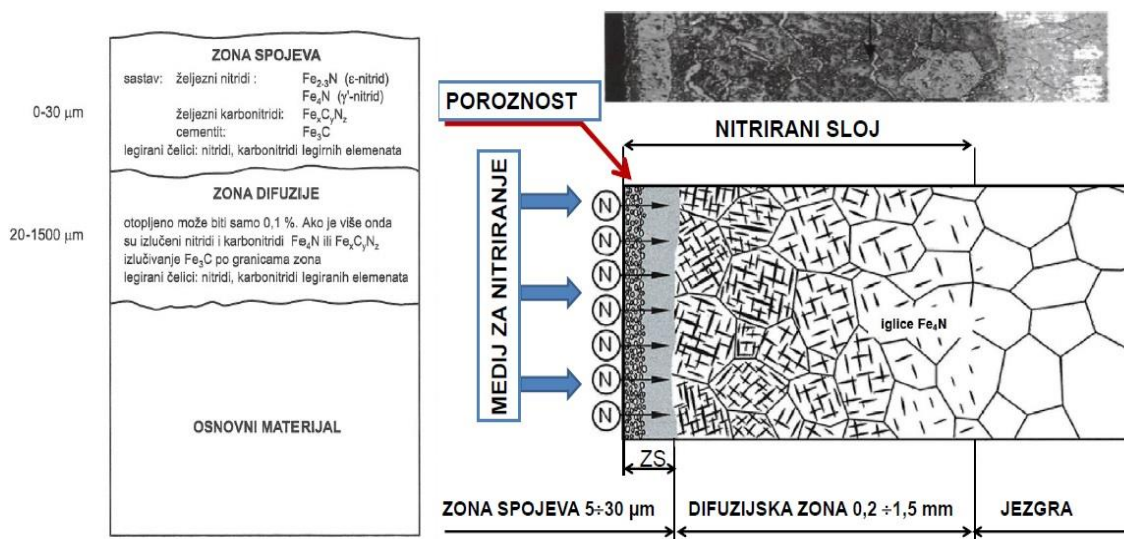
Nitriranje je toplinsko kemijska obrada kod koje dušik difundira u površinu predmeta te je na taj način modificira. U komercijalnoj uporabi je skoro 100 godina, a njena efikasnost je čini jednim od značajnijih postupaka. Nitriranjem se primarno želi postići površina otpornija na trošenje. Otpornost na trošenje je rezultat stvaranja nitrida na površini. Razlikuju se željezni nitridi -spojevi dušika sa željezom (Fe_2N i Fe_4N prikazanim na Sl. 28) i nitridi legirajućih elemenata odnosno spojevi dušika s legiranim elementima (CrN , AlN , itd.).



Sl. 28 Dijagram stanja željezo dušik [15]

Teoretski je moguće nitrirati sve čelike i ljevove međutim značajniji porast tvrdoće imaju samo oni koji u sebi sadrže nitridotvorce odnosno legirajuće elemente koji omogućavaju stvaranje stabilnih nitrida. Posebna skupina konstrukcijskih čelika su čelici za nitriranje a pogodnim za ovih postupak ih čine slijedeći legirajući elementi: 1,0-2,0 % Cr, 1% Al, 0,2 % Mo te manje količine Ni i V. Nitriranjem na površini nastaju zona spojeva i difuzijska zona Sl. 29 koji su zaslužni za veću tvrdoću te otpornost na trošenje i koroziju. Zona spojeva ima veću tvrdoću od difuzijske zone te je nosilac otpornosti na trošenje i koroziju a difuzijska zona povećava

dinamičku izdržljivost. Efektivne dubine nitriranog sloja iznose do 0.6 mm a debljine zone spojeva su do 20 mikrometara.



Sl. 29 Prikaz nitriranih slojeva [16]

Prije nitriranja poželjno je provesti toplinsku obradu poboljšavanja (kaljenje + popuštanje) s tim da temperatura popuštanja treba biti viša od temperature nitriranja. Razlog tome je zadržavanje optimalne sitnozrnate mikrostrukture koja je pogodna za difuziju dušika. Obzirom na to da nitriranje može biti završna obrada prethodno se izvodi mehanička obrada nakon koje slijedi žarenje za redukciju zaostalih naprezanja kako se ne bi dogodile neplanirane deformacije. Obradak se nakon pripreme površine (koja je odmašćena i bez nečistoća) stavlja u peć i izlaže sredstvu za nitriranje na temperaturama ispod A_1 (za čelik). Sredstvo zaduženo za oslobađanje dušika može biti rastaljena sol, plin ili plazma. Nitriranje se provodi u retornim pećima izgrađenima od vatrootpornog čelika legiranog silicijem. Ovaj materijal se koristi zato što ne apsorbira dušik. Od istog materijala (ili Ni legura) se izgrađene i ostale pomoćne naprave koje se nalaze u retorti (stalci i sl.). Nitriranjem na površini nastaju zona spojeva i difuzijska zona koji su zaslužni za veću tvrdoću te otpornost na trošenje i koroziju. Zona spojeva ima veću tvrdoću od difuzijske zone te je nosilac otpornosti na trošenje i koroziju a difuzijska zona povećava dinamičku izdržljivost. Efektivne dubine nitriranog sloja iznose do 0,6 mm a debljine zone spojeva su do 20 mikrometara. [14]. Kod Fe legura se na temperaturama nitriranja preko 590 C stvaraju krhki spojevi Fe_xN pa se stoga nitriranje provodi ispod te temperature. Rezultat

toga je također izostanak fazne pretvorbe pa je zato nitriranje pogodan postupak ukoliko se želi izbjeći promjena dimenzija obratka.

6.1.1. Plinsko nitriranje

Plinsko nitriranje je najstariji postupak nitriranja koji se provodi se u struji amonijaka koja disocira prema jednadžbi (16):



U tijeku nitriranja opažaju se tri faze;

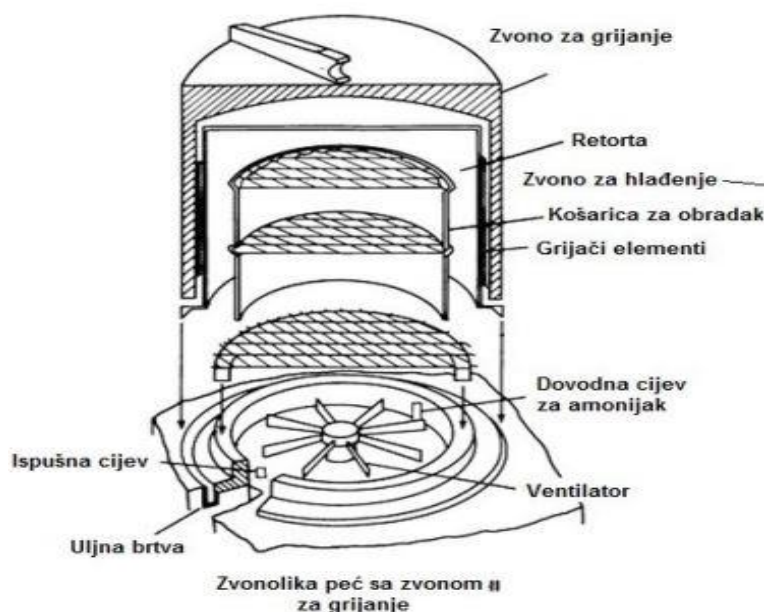
- Disocijacija amonijaka NH_3
- Ulazak dušika u $\alpha\text{-Fe}$, u početku u čvrstu otopinu, da bi se kasnije spojio u Fe_4N
- Difuzija u dubinu

Plinsko nitriranje Sl. 30 se najčešće odvija na temperaturama 500 do 550 u trajanju 40-60 sati. [17, 18], a osim njih također bitan parametar je i stupanj disocijacije amonijaka kojeg se prati nadzorom izlaznih plinova. Empirijski utvrđeni optimalni stupnjevi disocijacije amonijaka prikazani su u Tablici 5.

Tablica 5 Ovisnost stupnja disocijacije amonijaka o temperaturi procesa

Temperatura, C	Stupanj disocijacije amonijaka, %
500	18-25
550	25-40
600	40-60

Prije nitriranja retorta se ispire amonijakom sve dok udio zraka ne padne ispod 3%. Nakon toga se temperatura retorte povisi na 500 – 550°C te se uvodi 'osušeni ' NH_3 pod tlakom sa stupnjem disocijacije 18 – 25%. Nakon nitriranja predmeti se ohlađuju u isključenoj peći u struji NH_3 dok peć ne postigne 100 stupnjeva. Pritom nije dozvoljeno puštanje zraka jer bi došlo do stvaranja praskavca i eksplozije u peći. Trajanje nitriranje se računa od trenutka kad površina grijanih predmeta dosegne 500°C. Obradeni predmeti nakon nitriranja obično imaju mat sivu boju.



Sl. 30 Uređaj za plinsko nitriranje [12]

6.1.2. Nitriranje u solnoj kupci

Nitriranje u solnoj kupci se u literaturi također zove postupkom cijanizacije obzirom na to da se odvija u smjesi cijanidno-cijanatnih soli pri temperaturi 570 -580 stupnjeva u trajanju 2 do 4 sata. Tijekom nitriranja u solnoj kupci odvijaju se reakcije (16) i (17):

- Djelomična oksidacija cijanida u cijanat



- Stvaranje sode i raspad metastabilnog Na-cijanata



Standardnim nitriranjem u solnoj kupci ne postižu se visoke tvrdoće kao kod nitriranja u plinu pa se ono još naziva i meko nitriranje. Ipak, postoji poboljšani postupak nitriranja u solnoj kupci koji se zove Tenifer (kratica od latinskih riječi **T**enex-žilav, **N**itrogenium-dušik, **F**errum-željezo). Postupak je unaprijeđen uvođenjem zraka u kupku tijekom procesa radi podupiranja reakcije oksidacije cijanida u cijanat i održavanja dovoljno visokog sadržaja cijanata u kupci. Također je čelična kada zamijenjena kadom izrađenom od titana (ili je unutrašnjost čelične kada obložena limom izrađenim od Ti legure) čime je smanjeno neželjeno otapanje željeza u

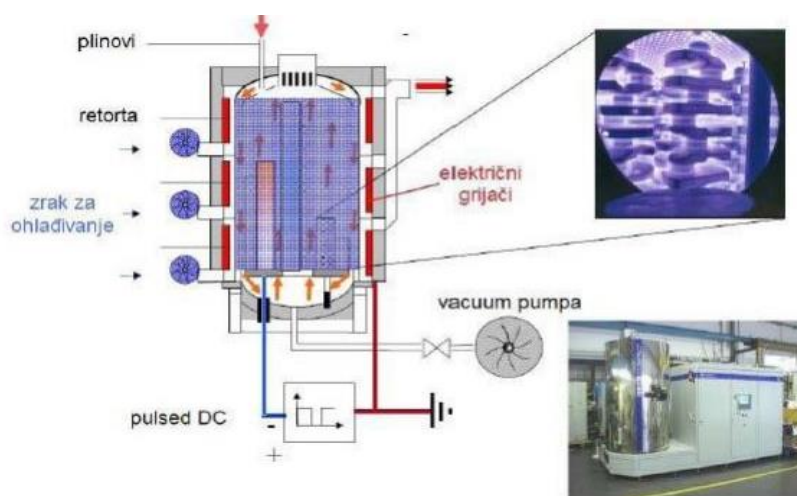
kupci. Umjesto rada sa jednom vrstom soli TENIFER postupak koristi dvije što omogućuje reguliranje sadržaja cijanida i cijanata. Navedena tehnološka poboljšanja omogućila su povećanje debljine zone spojeva za isto vrijeme nitriranja, smanjena je poroznost zone spojeva i povećana homogenost nitriranog sloja. Standardni TENIFER postupak odvija se na 570 C u trajanju od 0.5 do 4 h (ovisno o željenoj dubini nitriranja). Tenifer postupak ima više varijanti od kojih se ističu TeniferQ (gašenje nakon obrade), Tenifer QP (gašenje +poliranje) i Tenifer QPQ (gašenje +poliranje +naknadna oksidacija).

6.1.3. Nitriranje u plazmi

Nitriranje u plazmi (Sl. 31) je poboljšana varijanta nitriranja koja se provodi u vakumskoj komori gdje se pod djelovanjem visokog napona (400-1200 V) uvodi plin za nitriranje čije molekule disociraju i ioniziraju. Obradak predstavlja katodu a stijenka retorte anodu. Nastali ioni zahvaljujući uspostavljenom elektrostatskom polju velikom brzinom udaraju i difundiraju u površinu obratka.

Posljedica bombardiranja ionima

- Čišćenje površine uzorka
- Zagrijavanje uzorka
- Difuzija dušika



Sl. 31 Prikaz uređaja za plazmatsko nitriranje [16]

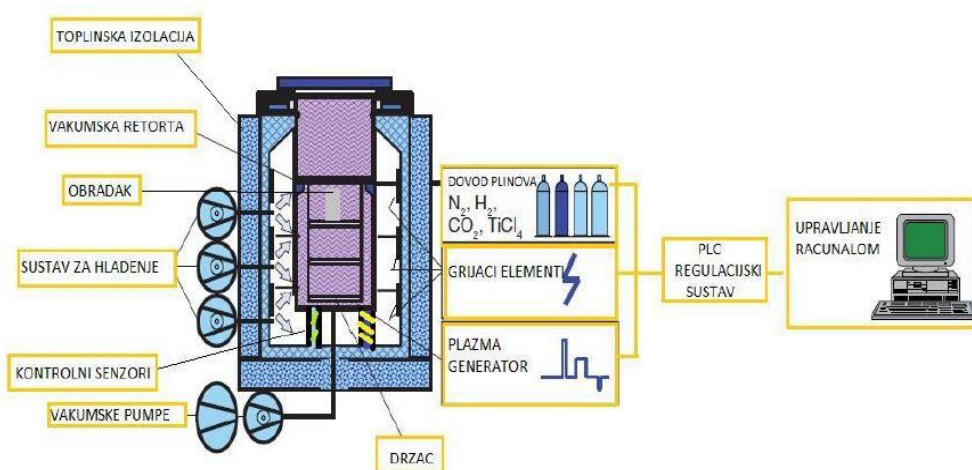
Udaranjem iona izbijaju se atomi željeza koji se zatim vežu s visokoreaktivnim atomima dušika iz plazme te se stvaraju željezni nitridi koji se talože na površini predmeta. Prednosti postupka su mogućnost izbjegavanja zone spojeva koja je ako se dobije žilavija, veće adhezije te manje porozna u odnosu na istu dobivenu kod ostalih postupaka nitriranja. Postupak je brz je i ekološki prihvatljiv, prikladan za automatizaciju uz relativno niske troškove obzirom na druga nitriranja. Dobiveni slojevi općenito veće čistoće i žilaviji. Nedostaci su velika investicijska ulaganja, velik broj utjecajnih parametara što zahtijeva educirane operatere, otežano nitriranje predmeta s dubokim rupama i ostrim bridovima [16].

6.2. PACVD prevlačenje

Kod PACVD postupka se pomoću plazme obavljaju slijedeći procesi [16]:

- ioniziranje i disocijacija plinova koji su nosioci dušika
- zagrijavanja osnovnog materijala
- aktivaciju kemijskih procesa

Sastavni dijelovi uređaja za PACVD postupak su vakuumska komora s grijačima, vakuumske crpke, sustav za dobavu plinova (N_2 , Ar, H_2 , CH_4) i prekursora ($TiCl_4$, BCl_3), generator plazme, sustav za neutralizaciju nusprodukata prevlačenja i PLC regulacijski sustav. Na Sl. 32 prikazan je shematski prikaz PACVD uređaja [16].



Sl. 32 Shematski prikaz PACVD uređaja

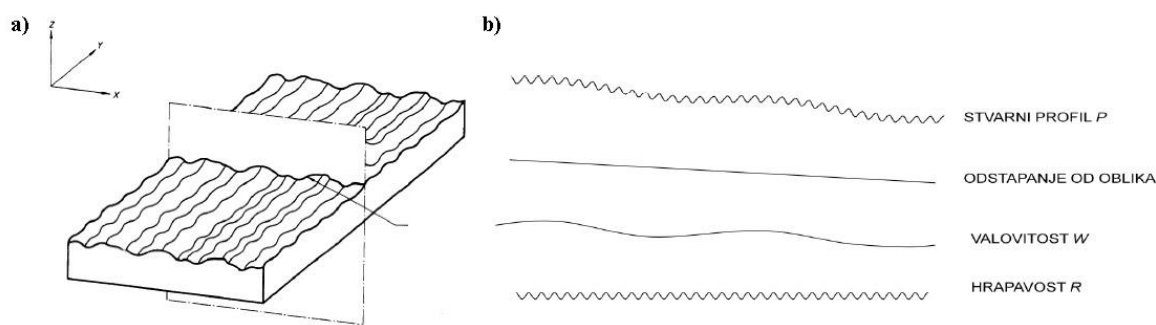
Postoji više načina aktiviranja plazme: pulsiranje istosmjerne (DC) ili izmjenične struje (AC), izboji radio frekvencije (RF), primjenom mikrovalne (MW) pobude i dr. Plazma se uspostavlja između uzorka na držaču koji predstavlja katodu i uzemljene stjenke reaktora. Uzorak se grije posebnim grijačima i djelovanjem plazme]. Na postupak utječu napon izboja, gustoća struje, protok plinova (nosača prekursora i onih koji čine plazmu) te kapacitet reaktora. Svi navedeni parametri određuju vrstu i svojstva prevlake.

7. Karakterizacija nitriranih površina

7.1. Ispitivanje površinske hrapavosti

Površinska hrapavost je sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta. Kod tehničkih površina rezultat je postupka obrade (ili nekog drugog procesa) a kvantificira se vertikalnim odstupanjem stvarne površine od njenog idealnog oblika. Veća hrapavost za posljedicu ima povećano trošenje, trenje, otpornost na koroziju te je smanjenja dinamička izdržljivosti. Manja hrapavost se postiže finijim postupcima obrade koji su u pravilu skuplji stoga je potrebno pronaći kompromis između postignute hrapavosti i one hrapavosti koja je dovoljna za eksploatacijske uvijete u kojima će se naći obradak. Zbog cijene i sljedivosti rezultata danas prevladava 2D mjerenje hrapavosti površine elektromehaničkim uređajem s ticalom. Temeljni 2D parametri na temelju kojih se vrednuju stanja površine dati su u nastavku. Za razumijevanje parametara hrapavosti prvo je potrebno definirati profil površine. Profil površine je presjek stvarne površine i ravnine čija je normala paralelna sa stvarnom površinom (Sl. 33a). Profilni filter je filter koji razdvaja profile na dugovalne i kratkovalne komponente [ISO 11562]. Uređaji za mjerenje hrapavosti koriste 3 profila pomoću kojih mjere hrapavost, valovitost te primarni profil (Sl. 33b))

Profil hrapavosti se izvodi iz primarnog profila R koristeći profilni filter λc koji zanemaruje dugovalne komponente te je osnova za mjerenje parametara hrapavosti Srednja linija profila m se posebno definira za primarni profil, profil hrapavosti te profil valovitosti. Za primarni profil se dobije metodom najmanjih kvadrata dok se za hrapavost i valovitost upotrebljavaju profilni filteri λc i λf [11, 19]

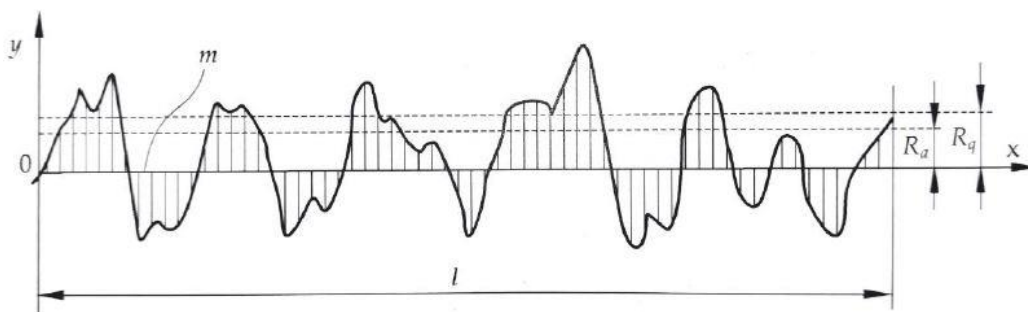


Sl. 33 Određivanje [11] : a) profila površine, b) odstupanja profila

U eksperimentalnom dijelu rada je mjeren profil hrapavosti pa su dalje u nastavku navedeni osnovni parametri hrapavosti.

R_a –Aritmetička sredina apsolutnih odstupanja profila od srednje linije (

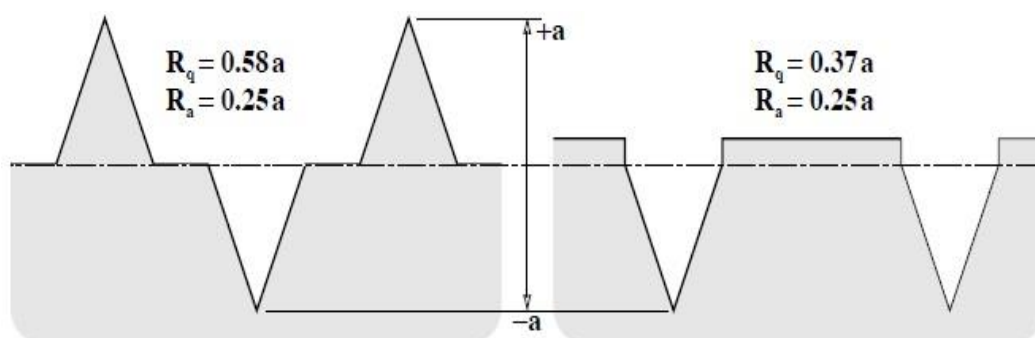
Sl. 34), najčešće korišten parametar hrapavosti na pripadnoj mjernoj dužini L .



Sl. 34 Profil površine s prikazanim parametrima R_a i R_q [11]

Ipak koristeći samo R_a može se steći krivi dojam o hrapavosti površine, na

Sl. 35 prikazan je primjer.



Sl. 35 Potpuno različite površine za jednaki R_a [12]

Zato je poželjno odrediti i sljedeće parametre hrapavosti prikazane na slikama (34-36) ;

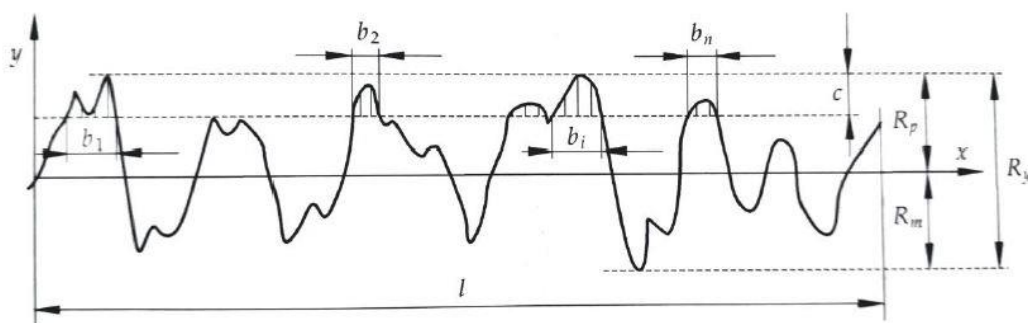
R_q -srednja kvadratna vrijednost profila p u granicama referentne duljine l

R_p-maksimalna udaljenost od srednje linije do vrha profila

R_m-maksimalna udaljenost srednje linije do dna udubine

R_y-udaljenost između najviše i najniže točke unutar referentne duljine

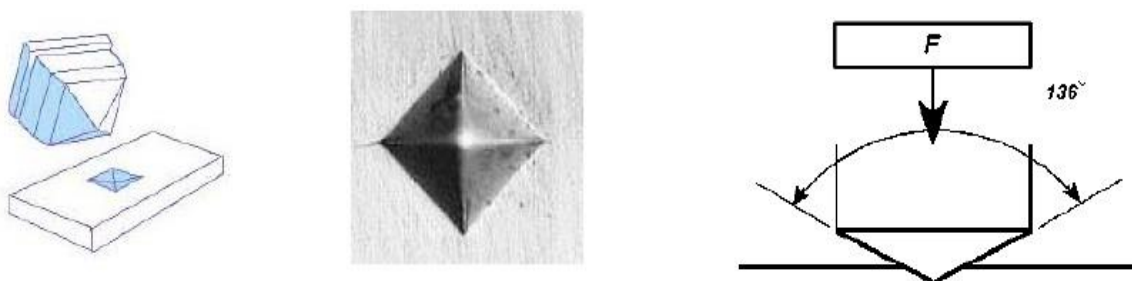
R_z-srednja vrijednost apsolutnih vrijednosti visine 5 najviših izbočina i dubine 5 najdubljih udubina u granicama referentne duljine l .

Sl. 36 Parametri R_y , R_p i R_m prikazani na profilu površine[11]

7.2. Ispitivanje mikrotvrdoće

Tvrdoća se definira kao otpor kojim se jedno tijelo suprotstavlja prodiranju drugog tvrdog tijela u njegovu površinu. Mjerenje tvrdoće provodi se na tvrdomjerima a sam postupak neznatno oštećuje površinu pa ga neki svrstavaju u nerazorne metode. Mjerenje tvrdoće kod većine metoda se temelji se na mjerenju dimenzija otiska što ga utiskivač ostavlja na ispitnom uzorku pri određenoj sili. Obzirom na primijenjenu silu tvrdoća se dijeli na makrotvrdoću ($F > 49.03\text{ N}$), mikrotvrdoću ($F < 1,96\text{ N}$) i nanotvrdoću (F je oko 100 mikro N).

Ispitivanje tvrdoće po Vickersu se provodi na način da se u površinu ispitnog materijala utisne dijamantni indentor u obliku pravilne uspravne četverostrane piramide kojoj su kutovi između susjednih bridova 136° . Pri tom nastaje otisak oblika piramide (Sl. 37) kod kojeg se uz pomoć svjetlosnog mikroskopa mjere duljine dviju dijagonala kvadrata te se računa srednja vrijednost.



Sl. 37 Izgled indentora i otiska kod metode Vickers

Tvrdoća ispitana metom Vickers se opisuje izrazom HV_{xy} koji predstavlja omjer primijenjene sile (u kilopondima) i površine otiska uzrokovane utiskivanjem piramide. Na mjestu sufiksa x

se piše narinuta sila izražena u kilopondima, a na mjestu y (koji se u praksi ponekad izostavi) vrijeme trajanja utiskivanja. Po ASTM-u se tvrdoća po Vickersu može izraziti izrazom (19):

$$HV = \frac{\bar{F}}{A} = 1,8544 \frac{F}{d_{sr}^2} \quad (19.a)$$

gdje je F sila u kilopondima, a d_{sr} srednja vrijednost dijagonali kvadratne baze otiska. Ako se koristi SI sustav potrebno je koristiti oblik jednadžbe (19)

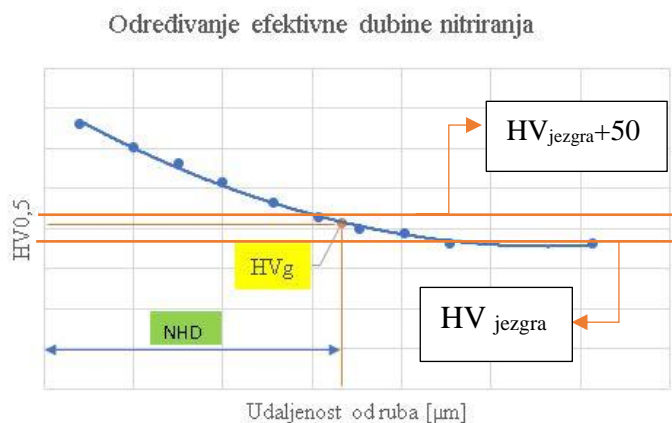
$$HV = 0,1891 \frac{F}{d_{sr}^2} \quad (19.b)$$

gdje je F sila u N, a d_{sr}^2 srednja duljina dijagonale kvadrata. Tvrdoće mjerene po Vickersu i Brinellu su gotovo identične do vrijednosti 350 HV (HB), međutim Brinellova metoda je limitirana maksimalnim iznosima sile. Obzirom na intenzitet sile utiskivanja razlikuje se

- Makrotvrdoća-49 do 980 N
- Semitvrdoća -1,96 do 49 N
- Mikrotvrdoća -ispod 1,96 N

7.3. Određivanje efektivne dubine nitiranja

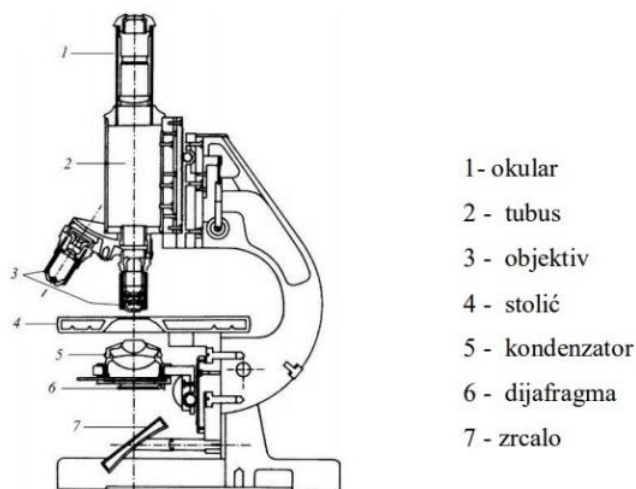
Nakon provedbe nitiranja dobije se različit raspored mikrotvrdoće po presjeku nitiranog predmeta. Na Sl. 38 je prikazan dijagram koji prikazuje odnos mikrotvrdoće po Vickersu ($HV_{0,5}$) i dubine na kojoj je izmjerena. Od posebnog interesa je parametar NHD (Nitride hardnes depth, u literaturi se također može pronaći i njemačka inačica NHt prema Nitridhartetiefe) koji predstavlja efektivnu dubinu nitiranja. Ona se određuje prema normi DIN 50190:1979 na način da se iz profila tvrdoće po presjeku odredi okomita udaljenost od ruba do mjesta gdje je postignuta granična tvrdoća koja je za 50 HV veća od tvrdoće jezgre.



Sl. 38 Određivanje efektivne dubine nitiranja (NHD)

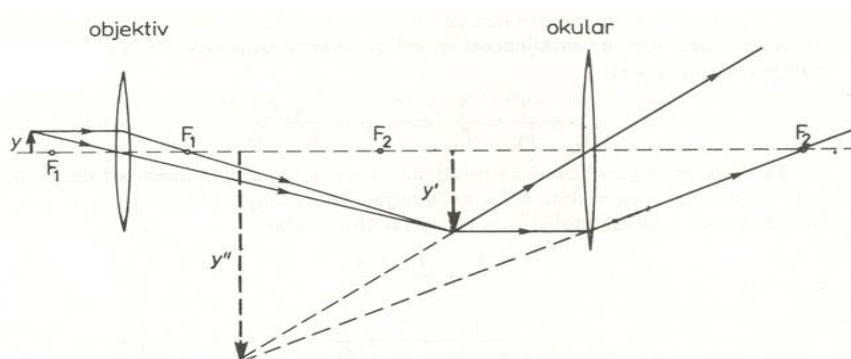
7.4. Karakterizacija površine svjetlosnim mikroskopom

Analiza mikrostrukture se provela svjetlosnim mikroskopom Sl. 39. Mikroskop je uređaj koji daje uvećanu sliku bliskog predmeta kojeg čije je detalje teško ili nemoguće proučavati direktno golim okom. Kod svjetlosnog mikroskopa nositelj slike je svjetlo odnosno fotoni koji prenose slike pomoću sustava leća. Svjetlosni mikroskopi se dijele na optičke i stereomikroskope.



Sl. 39 Osnovni dijelovi svjetlosnog mikroskopa [21]

Princip rada svjetlosnog mikroskopa je prikazan na Sl. 40. Mikroskop se sastoji od dvije konvergentne leće (objektiva i okulara). Objektiv je konvergentna leća male žarišne daljine. Predmet je udaljen od žarišta ($f < a < 2f$) i objektiv daje uvećanu realnu sliku. Okular služi za povećanje, stvaranjem virtualne slike povećava kut gledanja.



Sl. 40 Princip rada svjetlosnog mikroskopa []

Dvije bitne značajke svjetlosnog mikroskopa su rezolucija i povećanje i dubinska oštrina. Rezolucija je najmanja udaljenost dva susjedna elementa koji se mogu vidjeti odvojeno, a ovisi o numeričkoj aperturi objektiva i valnoj duljini svjetlosti koja se koristi za osvjetljenje. Povećanje govori koliko je slika uvećana u odnosu na stvarne dimenzije. Umnožak je povećanja okulara i povećanja objektiva. Dubinska oštrina je sposobnost mikroskopa da tvori oštru sliku na neravnim površinama, Svjetlosna mikroskopija se u ovom radu primjenjuje za mjerenje dimenzija otiska pri mjerenju mikrotvrdoće po Vickersu te za mjerenje debljine traga trošenja nastalog ispitivanjem adhezijskog trošenja block on ring metodom.

EKSPERIMENTALNI DIO

8. Priprema uzoraka i uređaja za ispitivanje adhezijskog trošenja

8.1. Toplinska obrada ispitnih uzoraka

Ispitni uzorak je unutarnji prsten valjnog ležaja proizvođača NTN oznake 1R30X35X17 (Sl. 41). Iz oznake se vidi da su dimenzije unutarnjeg promjera 30 mm, dimenzije vanjskog promjera 35 mm a širina 17 mm. Materijal je tipični čelik za izradu ležajeva oznake 100Cr6 kemijskog sastava prikazanog u Tablica 6.



Sl. 41 Prikaz ispitnog prstena

Tablica 6 Kemijski sastav čelika 100Cr6

Element	C	Si	Cr	Mn	P	S
Postotak %	0.93-1.05	0.15-0.35	1.35-1.6	0.25-0.45	<0.025	<0.015

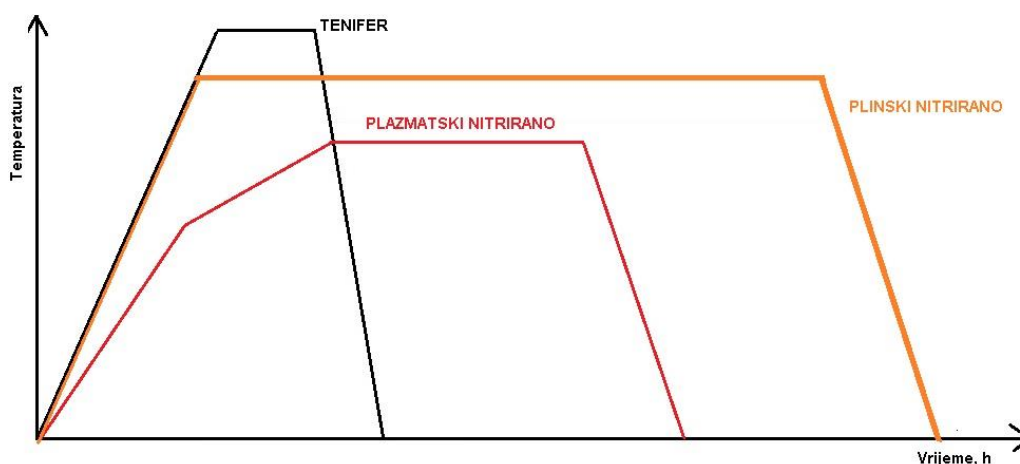
U eksperimentu su korišteni prsteni unutarnjeg ležaja čelika 100Cr6 u sljedećim stanjima:

- Osnovno stanje - Poboľjšano +brušeno
- Nitirano u plinu
- Nitirano u solnoj kupci TENIFER
- Nitirano u plazmi
- Prevučeno PACVD prevlakom TiN

Provedeni su slijedeća ispitivanja:

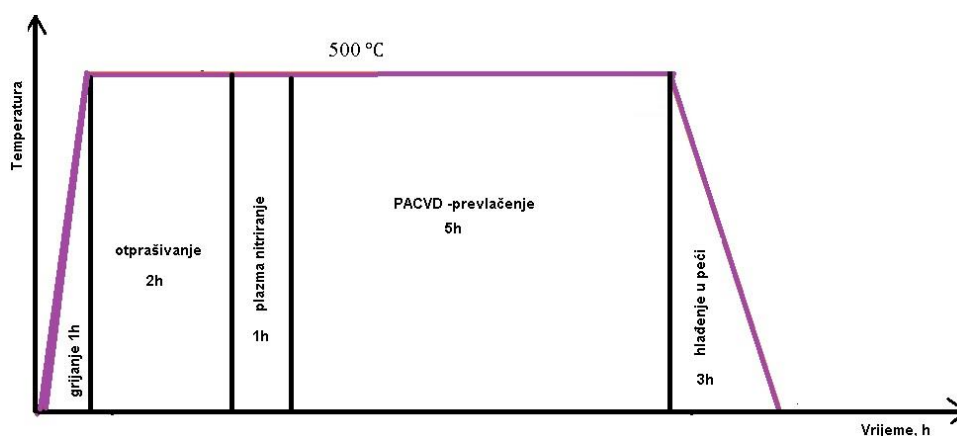
- Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje -Block on ring
- Određivanje debljine traga trošenja
- Ispitivanje hrapavosti
- Ispitivanje mikrotvrdoće i efektivne dubine nitiranja

Cilj ispitivanja bio je novom modificiranom metodom mjerenja trenja odrediti promjenu faktora trenja nastalu modificiranjem i prevlačenjem površine u odnosu na polazno stanje. Istražilo se u kojoj mjeri normalna sila djeluje na faktor trenja te se pokušalo odrediti pouzdanost mjerenja koristeći novu 'metodu'. Uzorci su bili podvrgnuti postupcima modificiranja površine (Sl. 42) i postupku prevlačenja PACVD (Sl. 43).



Sl. 42 Postupci modificiranja površine

Nitriranje u solnoj kupci TENIFER provelo se na 580°C u trajanju od 2 h nakon čega se gašenje odvijalo u vodi. Plinsko nitriranje se provedeno je na 520 °C u struji amonijaka NH_3 i dušika N_2 nakon čega se hladilo u dušiku. Nitriranje u plazmi se odvijalo na nižoj temperaturi od prethodna dva postupka te se sastojalo od četiri faze ; zagrijavanja, čišćenja površine, samog nitriranja te hlađenja u peći. Na je shematski prikazan postupak PACVD prevlačenja slojem TiN



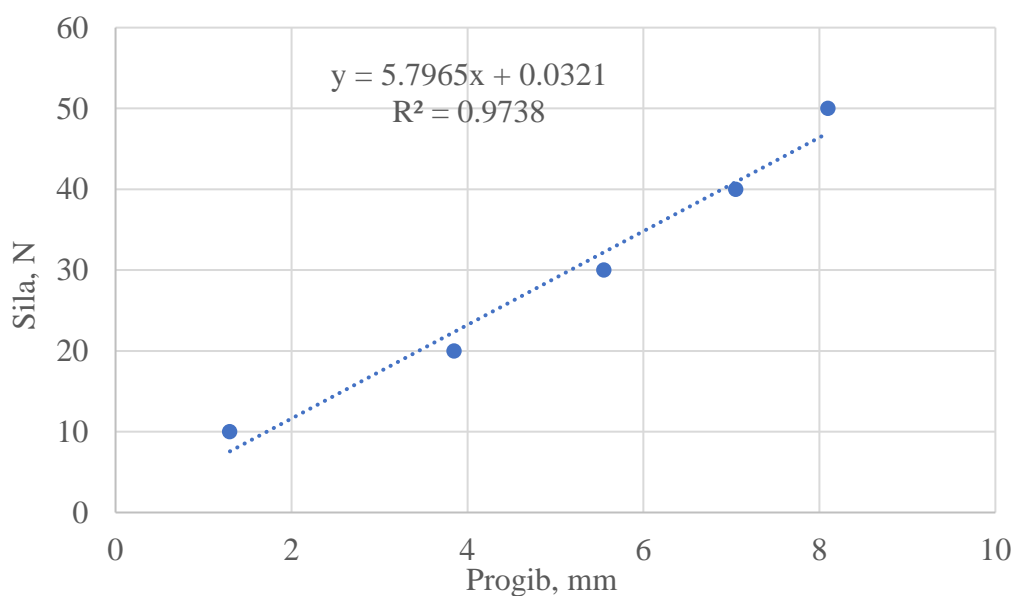
Sl. 43 Shematski prikaz postupka PACVD prevlačenja

8.2. Priprema uređaja za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

Prvi korak u ispitivanju je određivanje konstante opruge. Ona se vrši na način da se uz pomoć dinamometra opruga savija statičkom silom F nakon čega se bilježe pripadni progibi pomoću mjerne ure. U Tablica 7 su prikazane narinute sile i izmjereni progibi mjernom urom. Rezultati su također prikazani na Sl. 44 gdje se može uočiti linearna zavisnost progiba o sili savijanja.

Tablica 7. Izmjereni progib opruge ovisan o sili savijanja

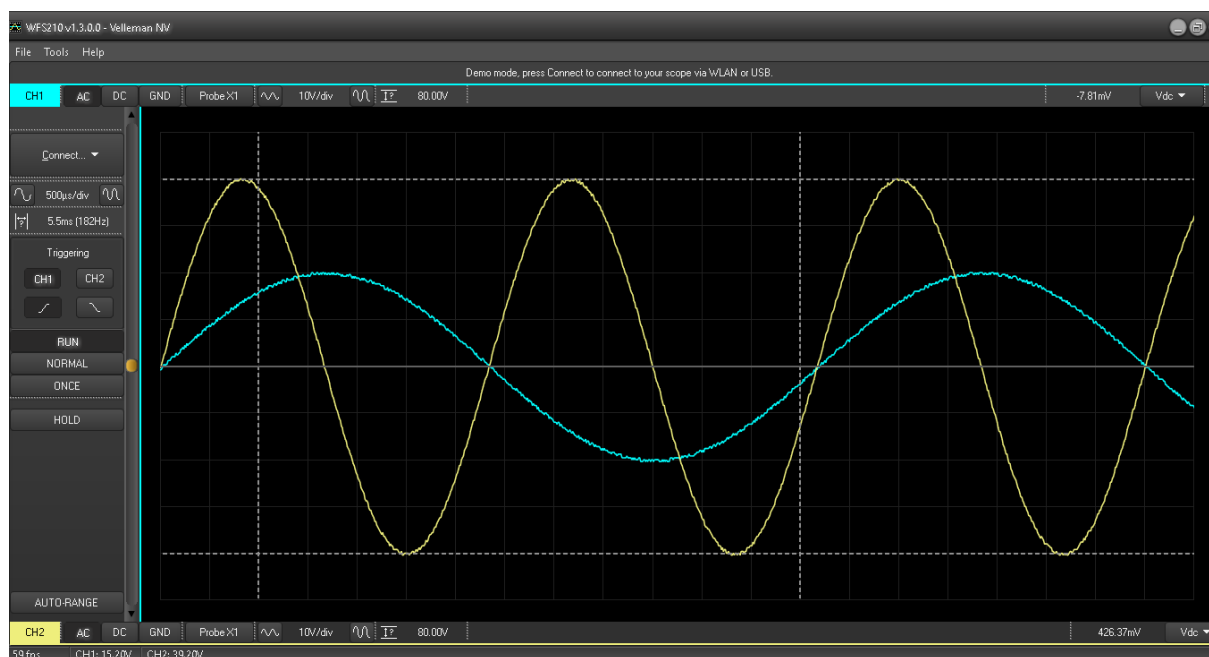
F_s [N]	Progib [mm]
10	1,3
20	3,85
30	5,55
40	7,05
50	8,1



Sl. 44 Ovisnost sile savijanja o produljenju savojne opruge

Konstanta opruge predstavlja koeficijent smjera pravca dobiven regresijskom analizom. Izračunata konstanta opruge iznosi $C=5,7965$ N/mm. Nakon što je određena konstanta opruge može se ići na idući korak. Potrebno je propisno montirati senzor, napajanje, WiFi, PC, metu.

Nakon pokretanja mjerenja u računalnom programu za bilježenje napona može se pokrenuti stroj.. Program pohranjuje podatke o naponu u rasponu od 0-10 V a frekvencija mjerenja mu je bila 50 Hz što je rezultiralo time da se svakih 0,02 sekunde bilježi napon. Rezultat mjerenja je dakle naponski odziv koji se sastojao od 4000 točaka koje su se pohranile u Excel datoteci. Na Sl. 45 je prikazano programsko sučelje aplikacije korištene za prihvrat podataka.



Sl. 45 Programsko sučelje aplikacije za prikupljanje podataka sa induktivnog senzora

Pošto svaki izmjereni napon pripada točno određenoj udaljenosti od senzora idući korak sastoji se u računanju položaja mete preko relacije (19).

$$S = \frac{U[v]}{1,111[\frac{V}{mm}]} \quad (19)$$

Preko ove relacije može se točno znati na kojoj se udaljenosti od senzora nalazi meta. Iz jednadžbe vidimo kako se svakih 1 mm napon promjeni za 1,111 V. Već je spomenuto kako je raspon detekcije senzora od 0 do 10 mm a iz rezultata mjerenja se vidi kako je meta u gornjem graničnom dijelu gdje je karakteristika senzora još uvijek linearna. Ove operacije se jednostavno izvode u programskom paketu Excel. Određivanjem maksimalnog položaja S_{max} se zapravo određuje maksimalnu udaljenost mete od senzora tj. početni referentni položaj za mjerenja. Može se zaključiti kako se pri maksimalnoj udaljenosti mete od senzora generira i

maksimalni napon. Razlog tome je što meta kad je najudaljenija najslabije djeluje na magnetsko polje senzora. Pomak se računa kao razlika maksimalnog položaja i trenutnog položaja (jednadžba (20)) odnosno prema izrazu (21)

$$u = S_{max} - S_{trenutni} \quad (20)$$

$$u = \frac{U_2}{C} - \frac{U_1}{C} \quad (21)$$

Već je prethodno utvrđeno kako je sila trenja jednaka sili savijanja pa se za računanje sile trenja može iskoristiti pomak u i konstanta opruge (jednadžba (22)). U konačnici faktor trenja se određuje iz relacije (1).

$$F_{tr} = F_s = u * c = (S_{max} - S_{min}) * c \quad (22)$$

9. Rezultati ispitivanja hrapavosti

Hrapavost je ispitana u Laboratoriju za precizna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitana je hrapavost prstenova u sljedećim stanjima:

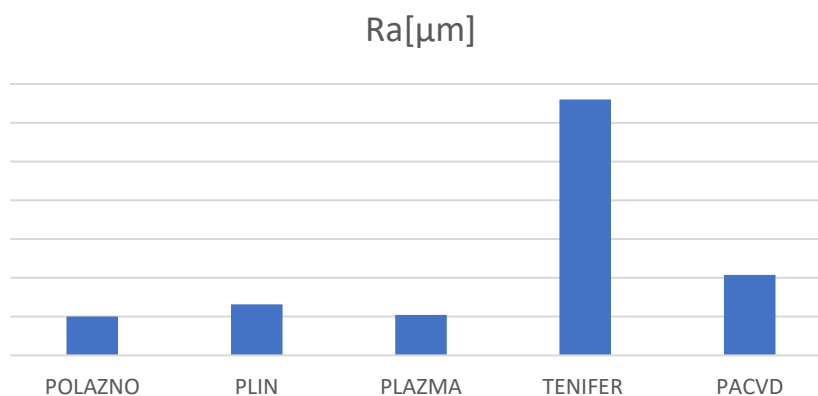
- Polazno
- Plinski nitrirano
- Plazmatski nitrirano
- Nitrirano u TENIFER kupci
- Prevučeno PACVD prevlakom TiN

U Tablica 8 su prikazani iznosi rezultata mjerenja sljedeće parametre hrapavosti:

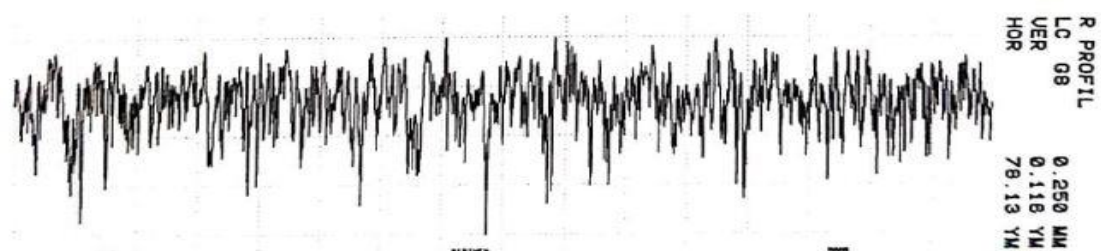
- R_a
- R_z
- R_{max}

Tablica 8 Izmjerene vrijednosti parametara hrapavosti

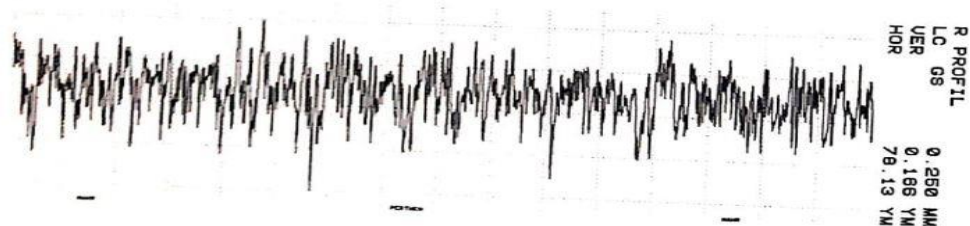
Parametri hrapavosti	Polazno stanje	Plinski nitrirano	Plazma nitrirano	TENIFER	PACVD Tin/TiCN
$R_a[\mu m]$	$0,050 \pm 0,03$	$0,066 \pm 0,002$	$0,052 \pm 0,003$	$0,330 \pm 0,023$	$0,104 \pm 0,018$
$R_z[\mu m]$	$0,400 \pm 0,039$	$0,513 \pm 0,021$	$0,418 \pm 0,056$	$2,301 \pm 0,246$	$1,106 \pm 0,215$
$R_{max}[\mu m]$	$0,470 \pm 0,059$	$0,593 \pm 0,049$	$0,513 \pm 0,075$	$2,950 \pm 0,290$	$1,526 \pm 0,377$



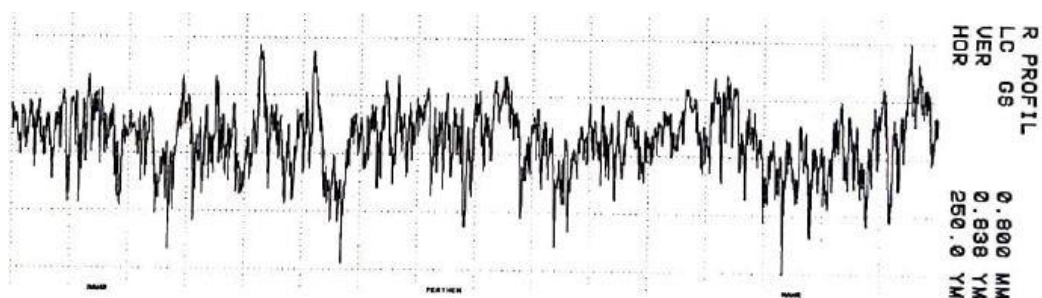
Sl. 46 Usporedba hrapavosti



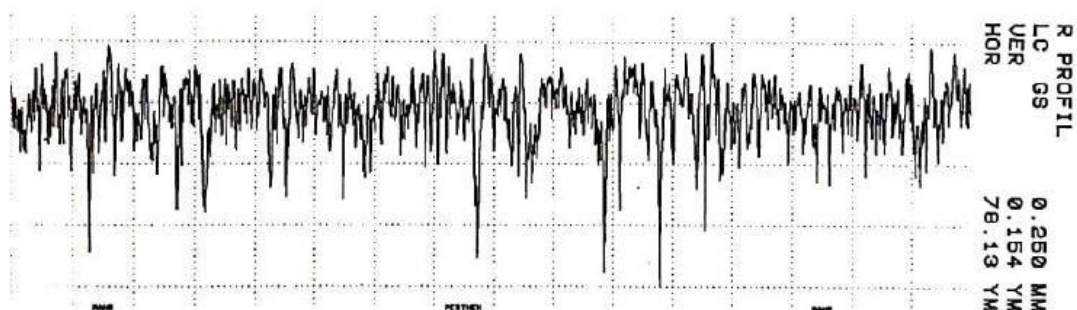
Sl. 47 Profil hrapavosti za polazno stanje



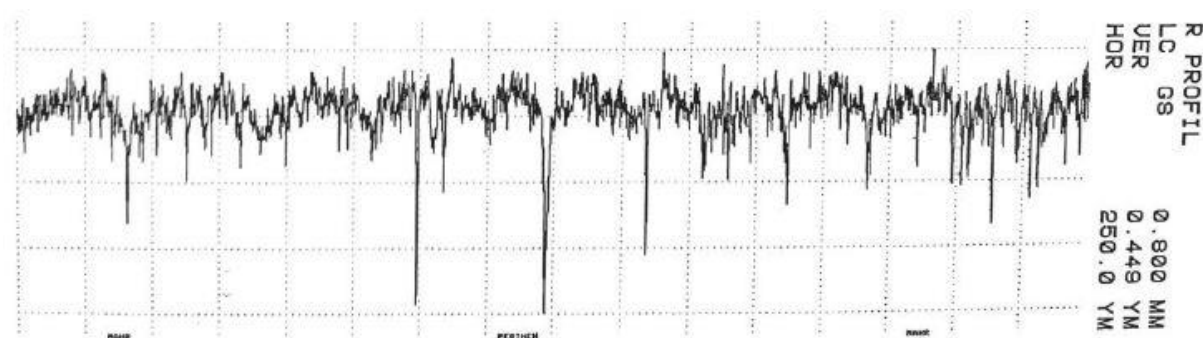
Sl. 48 Profil hrapavosti prstena nitriranog u plinu



Sl. 49 Profil hrapavosti za prsten nitriran u solnoj kupci Tenifer



Sl. 50 Profil hrapavosti za prsten nitriran u plazmi



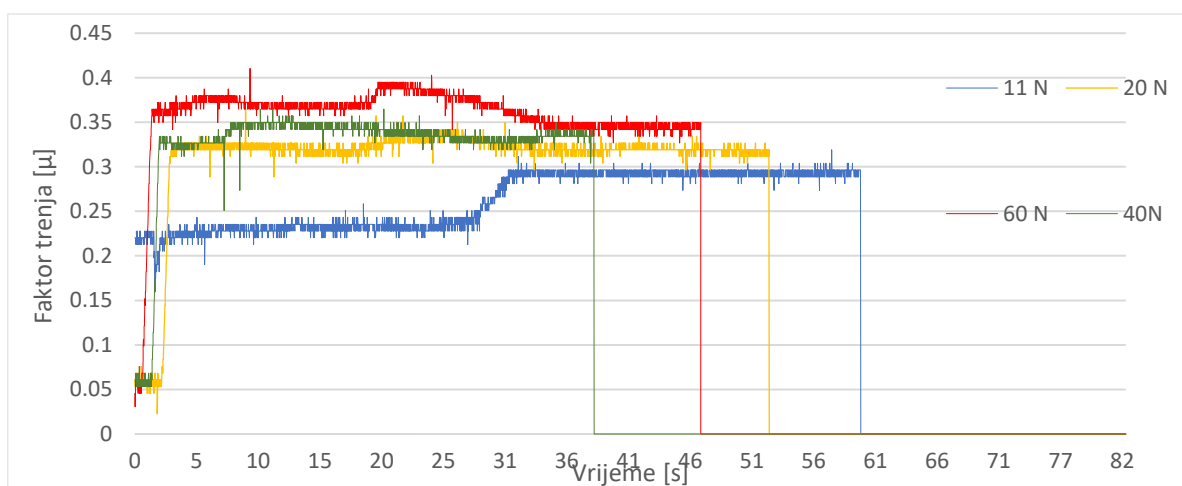
Sl. 51 Profil prevučen PACVD prevlakom TiN

Izmjereni parametri hrapavosti pokazuju kako se postupcima modificiranja i prevlačenja povisuje hrapavost polaznog materijala. To je najizraženije kod uzorka nitriranog u solnoj kupci TENIFER čije se hrapavost povećala za 6 puta. Hrapavost slojeva prevučenih u plazmi je neznatno promijenila hrapavost (4%) dok se nitriranjem u plinu ona promijenila za 25%. Iz profila hrapavosti prikazanih na Sl. 47 do Sl. 51 mogu se vidjeti rezultati primijenjenih površinskih obrada. Na profilu hrapavosti polaznog stanja na Sl. 47 vidi se utjecaj brušenja zbog ujednačenog izgleda profila s malim brojem brjegova. Profil površine koji je najbliži polaznoj je onaj nitriran u plazmi kod kojeg je smanjeni broj izbočina rezultat postupka otprašivanja koji je sastavni dio plazma nitriranja. Kod plinskog i TENIFER nitriranja nastaje površina čiji profil sadrži veći broj brjegova s tim da je kod TENIFER postupka vidljiva veća širina profila koji je rezultat nastanka porozne zone spojeva.

10. Rezultati ispitivanja faktora trenja

10.1. Određivanje graničnog opterećenja tribopara i mjernog područja senzora savijanja opruge

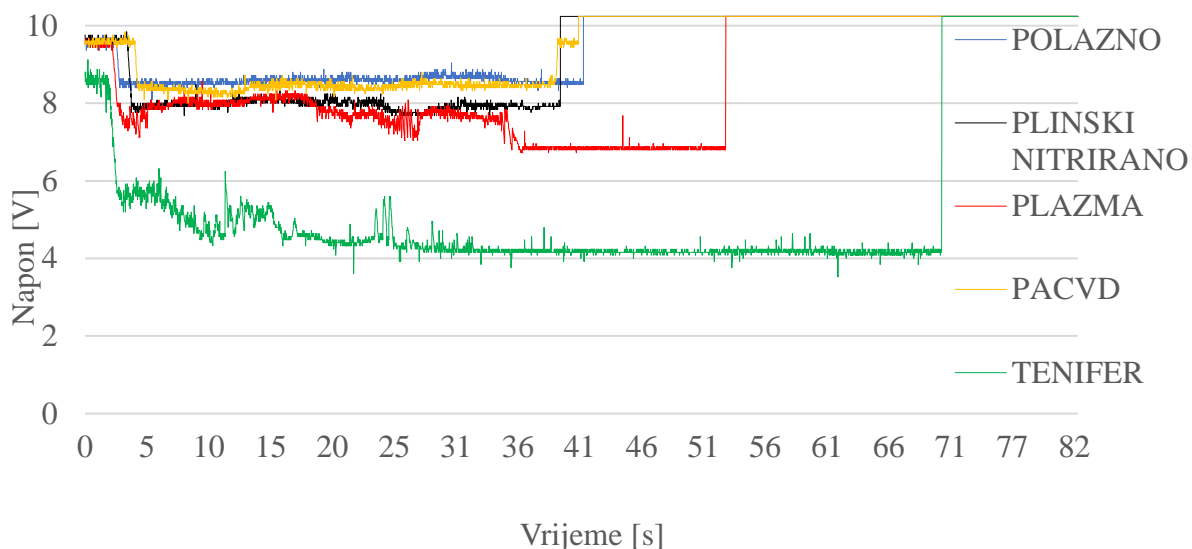
Na Sl. 52 prikazane su krivulje faktora trenja za različite primjenjene normalne sile. Može se zaključiti kako s porastom normalne sile raste i faktor trenja. Također je istraženo ostaje li se za raspon sila od $F_n=11\text{ N}$ do $F_n=60\text{ N}$ unutar mjernog područja (pošto je senzor limitiran mjernim područjem od 0 do 10 mm). Za provjeru se uzeo 'najgori' slučaj opterećenja, za koji progib opruge poprima maksimalni iznos, a to je $F_n=60\text{ N}$ i $\mu=0,4$. Njihovim uvrštavanjem u izraz (3) te koristeći konstantu opruge izračunatu pri kalibraciji $C=5,7965\text{ N/mm}$ određuje se progib $u=4,14\text{ mm}$. Pošto se taj iznos nalazi unutar mjernog područja (0-10mm) može se zaključiti kako se ova metoda može pouzdano koristiti za raspon normalnih opterećenja od $F_n=11\text{ N}$ do $F_n=60\text{ N}$ čime su obuhvaćeni rasponi faktora trenja od 0,2 do 0,4.



Sl. 52 Utjecaj povećanja sile F_n na ispitni uzorak u polaznom stanju

10.2. Ispitivanje faktora trenja uz malo opterećenje tribosustava

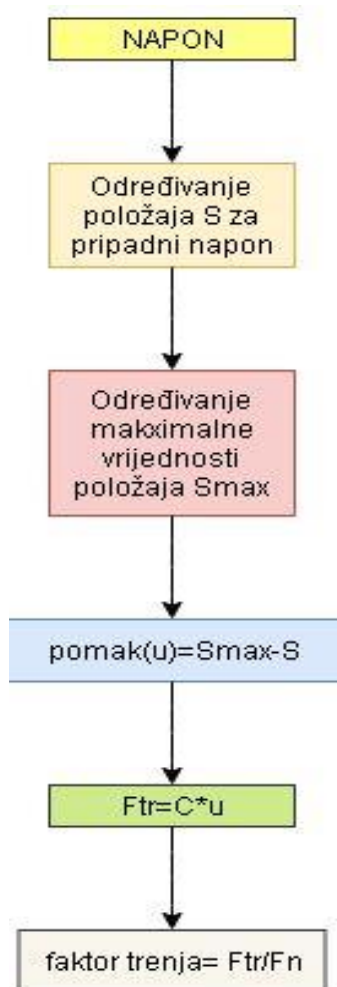
Na Sl. 53 se vidi rezultat provedenog eksperimenta koji nakon što je spremljen kao Excel datoteka može poslužiti za istraživanje raznih parametara. Rezultat mjerenja je naponski odziv u trajanju od 82 sekunde.



Sl. 53 Izmjereni naponi za pet različitih stanja površine, $F_n=11\text{ N}$

Na Sl. 53 se vide naponi generirani indukcijskim senzorom pri ispitivanju adhezijskog trošenja za 5 različitih stanja površine; polazno, plinski nitrirano, nitrirano u TENIFER kupci, nitrirano u plazmi te prevučeno PACVD TiCN prevlakom. Mogu se primijetiti tri karakteristična područja na dijagramu svakog stanja. Na početku se vidi skokoviti pad napona, što predstavlja nagli ulazak u rad i početka trošenja, srednji dio karakterizira oscilirajući napon koji varira oko neke vrijednosti te zadnji dio kod kojeg napon skoči na konstantnu vrijednost što zapravo predstavlja očitavanje sustava mjerenja uzrokovano gašenjem gdje dolazi do maksimalne promjene magnetskog toka što uzrokuje maksimalni očitani napon koji se generira u ostalim mjernim točkama neovisno o tome koliko dugo se u stvarnosti mjerilo (ovo ima veze sa karakteristikom mjernog sustava te bi se taj rezultat trebao zanemariti) Za eksperiment je dakle najvažniji srednji dio krivulje. Pomoću njega se dobije faktor trenja a osim toga on nam pomaže da pomoću oscilacija vidimo karakter trošenja za vrijeme eksperimenta što dosad nije bilo moguće (oscilacije većih amplituda predstavljaju nestabilniji rad i neuhodane površine, skokovi su uzrokovani česticama trošenja koje se nađu na putu te se 'zalijepe'. Prije nastavka analize rezultata jako bitno je napomenuti kako su ispitivanja obavljena u dvije skupine ispitivanja. U prvom setu ispitivanja su trošeni uzorci u polaznom, plinski i plazmatski nitriranom stanju te oni koji su prevučeni PACVD prevlakom TiN. U drugom setu ispitivanja trošen je uzorak koji je bio podvrgnut nitriranju u solnoj kupci TENIFER. Obzirom na to da nisu bili osigurani isti početni uvjeti (jednaka udaljenost mete od senzora) ne čudi to što naponski odziv TENIFER uzorka znatno odstupa. Ipak, za određivanje faktora trenja ovom metodom nisu bitni iznosi

napona već razlika udaljenosti referentnog nultog položaja i trenutnog položaja (jer će se uz pomoć te veličine dobiti pomak i sila trenja). Idući koraci prikazani su shematski na Sl. 54 .

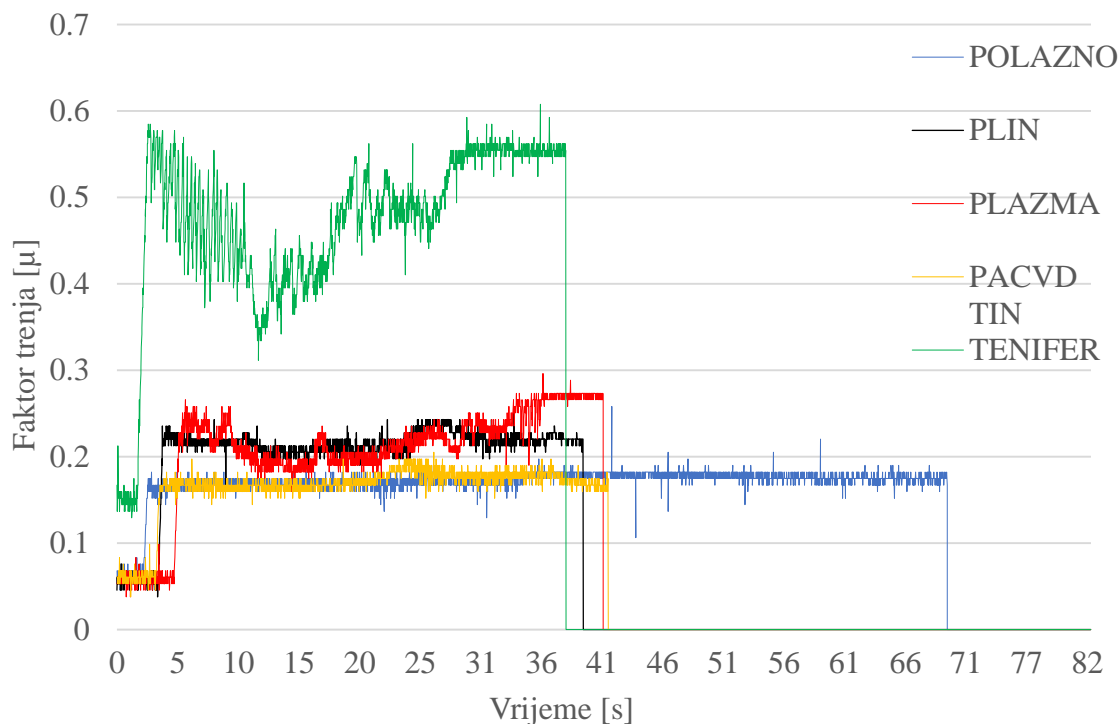


Sl. 54 Dijagram operacija za dobivanje faktora trenja

Pojašnjenje uz sliku Sl. 54: S [mm]-udaljenost mete od senzora, S_{max} [mm] - maksimalna udaljenost mete od senzora, u - pomak, C -konstanta opruge[N/mm], F_{tr} [N]- sila trenja koja je jednaka sili savijanja opruge F_s pa se računa izrazom $F_{tr}=F_s=C*u$, F_n [N]-normalna sila.

Nakon što se provedu radnje prikazane u blok dijagramu na

Sl. 54 dobiju se prosječni faktori trenja za 5 različitih stanja površine trošene normalnom sile u iznosi od 11 N. Prikazani su na Sl. 55 .



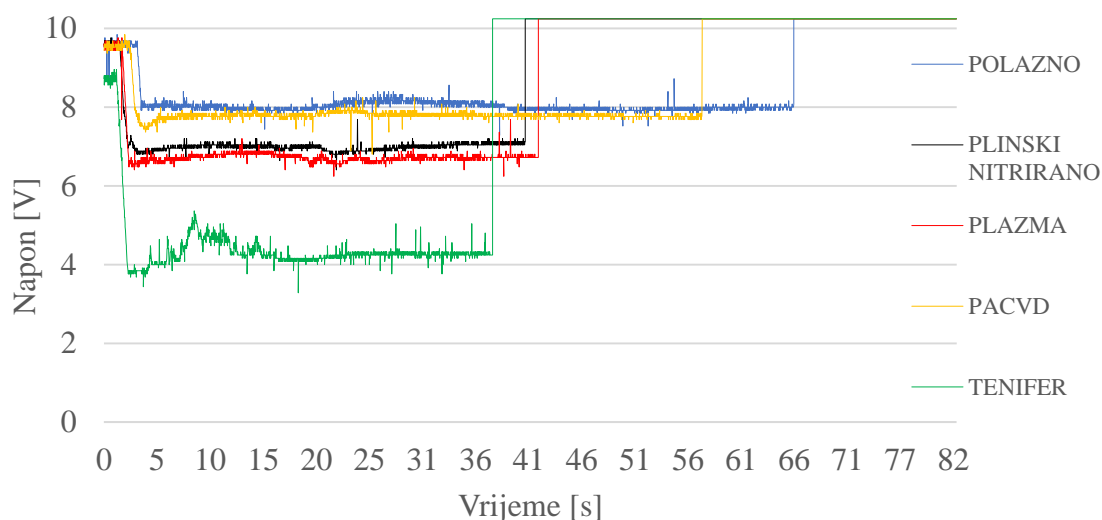
Sl. 55 Usporedba faktora trenja različitih stanja kod utega 1120 g

Iz Sl. 55 se vidi da najmanji faktor trenja imaju polazno i PACVD TiN prevučeno stanje što je očekivano obzirom na niže hrapavosti. Osim niže hrapavosti primjećuju se i manje oscilacije što znači stabilniji rad. Također su i plin i plazma slični jedno drugom te im je faktor trenja porastao u odnosu na polazno i PACVD prevučeno stanje. Uzorak nitriran u solnoj kupci TENIFER znatno više odudara od ostalih, te mu je faktor trenja za oko 50 % veći od drugih. Iako ovakav rezultat budi sumnje, očekivan je i potvrđuje ispravnost metode, obzirom na to da je za vrijeme ispitivanja opruga značajno više titrala nego kod drugih uzoraka što nije moglo proći nezamijećeno. Isto tako kod TENIFER postupka se stvori zona spojeva kojoj je potrebno određeno uhodavanje, odnosno stvaranje početnog traga trošenja.

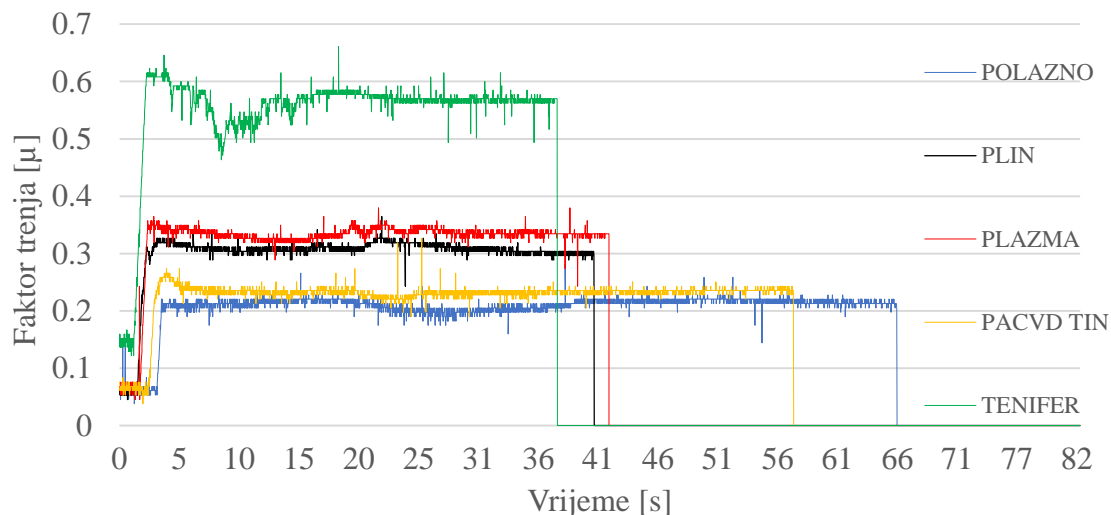
10.3. Ispitivanje faktora trenja uz veće opterećenje tribosustava

U drugom dijelu eksperimenta se povećala normalna sila na iznos $F = 20 \text{ N}$. Snimanjem pokusa se nastojalo utvrditi koliko je promjena normalne sile utjecala na faktor trenja. Rezultati su prikazani na Sl. 56.

. Nakon što se naponi preračunaju dobiju se faktori trenja prikazani na .Sl. 57.



Sl. 56 Izmjereni naponi za 5 različitih stanja površine, $F_n = 20 \text{ N}$



Sl. 57 Usporedba faktora trenja različitih stanja kod utega 2000 g

U Tablica 9 i Tablica 10 prikazani su statistički parametri faktora trenja primjenom različitih normalnih sila od 11 N i 20 N. Također, isti podaci su prikazani grafički na Sl. 58 i Sl. 59.

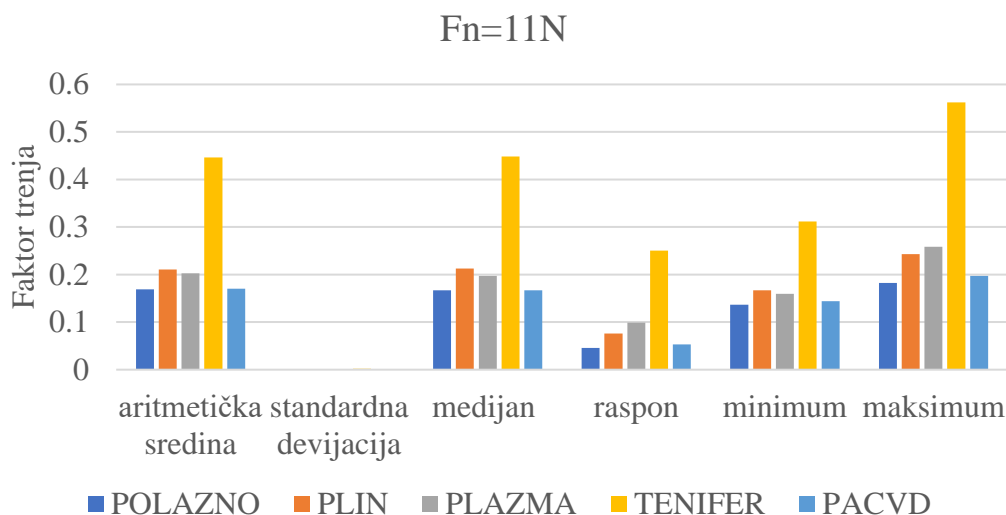
Tablica 9 Statistički parametri faktora trenja za F 11N

	POLAZNO	PLIN	PLAZMA	TENIFER	PACVD
aritmetička sredina	0.169168	0.210728	0.202693	0.446169	0.170007
standardna devijacija	0.0002	0.000284	0.000518	0.001722	0.000308
medijan	0.16715	0.212737	0.197541	0.448267	0.16715
raspon	0.045586	0.075977	0.098771	0.250726	0.053184
minimum	0.136759	0.16715	0.159553	0.311508	0.144357
maksimum	0.182346	0.243128	0.258323	0.562233	0.197541

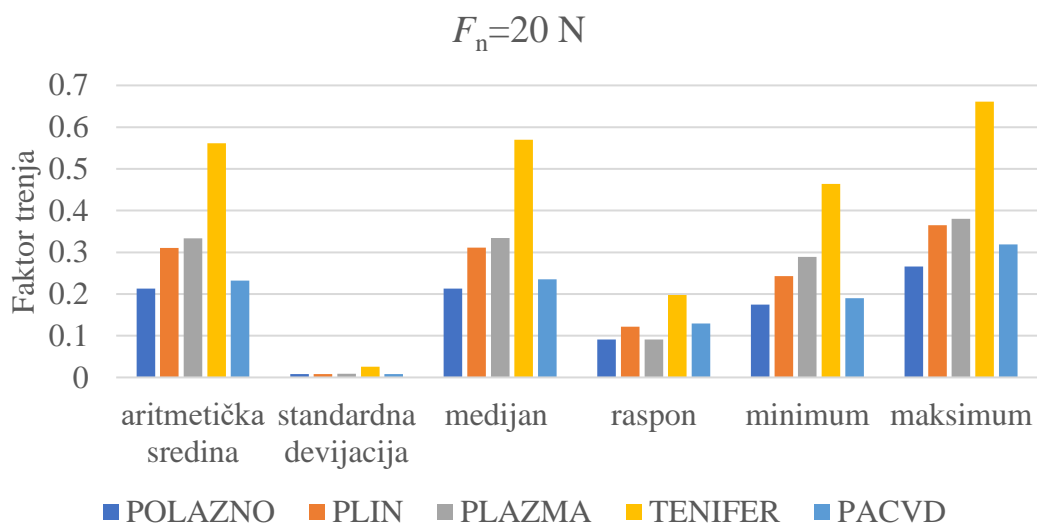
Tablica 10 Statistički parametri faktora trenja za F 20N

	POLAZNO	PLIN	PLAZMA	TENIFER	PACVD
aritmetička sredina	0.212555	0.310437	0.333549	0.561322	0.231727
standardna devijacija	0.007864	0.007973	0.009083	0.025535	0.008099
medijan	0.212737	0.311508	0.334301	0.569831	0.23553
raspon	0.091173	0.121564	0.091173	0.197541	0.129162
minimum	0.174748	0.243128	0.288714	0.463462	0.189944
maksimum	0.265921	0.364692	0.379887	0.661004	0.319105

Statistički parametri dani u Tablica 9 i Tablica 10 odnose se na razdoblje ispitivanja između 5 i 25 sekunde gdje faktor trenja stabilno oscilira oko određene vrijednosti . Ipak, i u ovom ‘stabilnom’ području vidljive su oscilacije uzrokovane adhezijom .Odabirom ovog područja eliminirani su utjecaji naglog ulaska u prilikom čega je vidljivo više trenje .



Sl. 58 Usporedba statističkih parametara kod sile 11N



Sl. 59 Usporedba statističkih parametara kod sile 20N

U Tablica 11 je prikazana postotna razlika faktora trenja između osnovnog stanja pri sili $F_1=11N$ i toplinski tretiranog stanja pri silama $F_1=11N$ i $F_2=20N$. Jasno se vidi porast faktora trenja kod svih tretiranih uzoraka. Također je prikazan omjer između iznosa faktora trenja pri sili $F_1=11 N$ i $F_2=20 N$. Korištenjem duplo veće ispitne sile zabilježen je značajan porast faktora trenja kod svih uzoraka osim onih nitriranih u solnoj kupci TENIFER koji se promijenio za samo 3 %. Ostali rezultati potvrđuju podatke iz literature o utjecaju normalne sile na silu trenja.

Tablica 11 Porast faktora trenja ovisno o normalnoj sili (F_n) u odnosu prsten u osnovnom stanju opterećen sa $F_n=11N$

	Plinski nitrirano	Plazma nitrirano	TENIFER	PACVD
$F_1=11\text{ N}$	24%	19 %	163%	5%
$F_2=20\text{ N}$	47%	56%	167%	8%
F_2/F_1	5%	94%	3%	36%

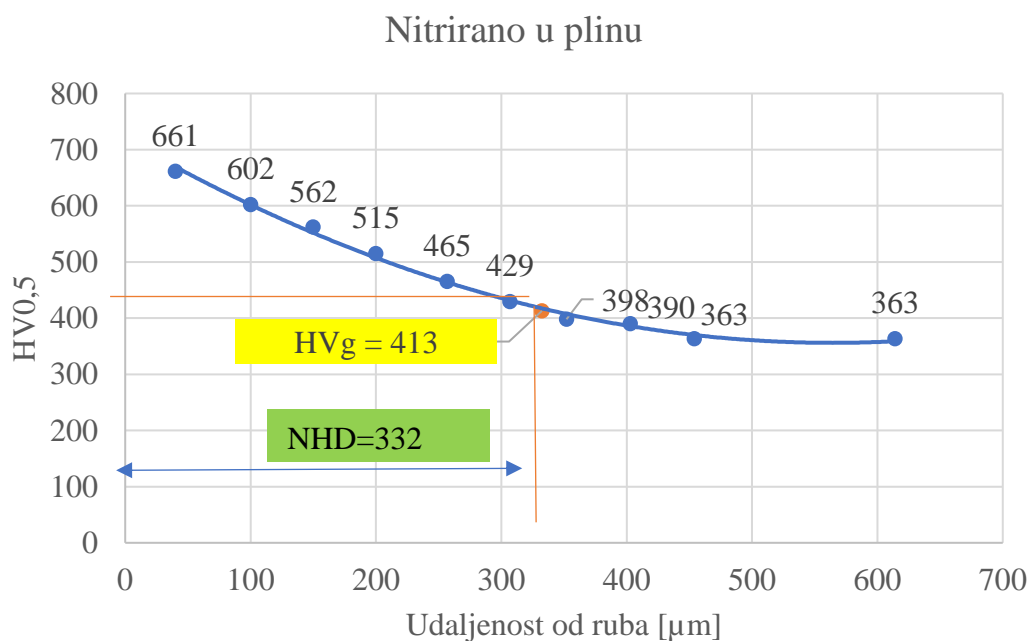
10.4. Određivanje mikrotvrdoće i efektivne dubine nitriranja

U svrhu ispitivanja mikrotvrdoće uzorci se izrezani i zaliveni u polimernu masu (Sl. 60). Mikrotvrdoća je mjerena na uređaju, Wilson-Wolpert Tukon 2018. Korištena metoda je bila $HV_{0,5}$ što znači da je pritiska sila bila $F=4,905\text{ N}$. Efektivna dubina nitriranja je udaljenost od površine prema unutrašnjosti na kojoj je tvrdoća za $50HV_{05}$ veća od tvrdoće u jezgri. U nastavku su dati rezultati mjerenja tvrdoće po presjeku za svih 5 različitih stanja.

**Sl. 60** Metalografski pripremljen ispitni uzorka za određivanje efektivne dubine nitriranja

Tablica 12 Raspored mikrotvrdoće po presjeku za uzorak nitriran u plinu

HV _{0,5}	661	602	562	515	465	429	398	390	363
Udaljenost od ruba [μm]	40	100	150	257	307	352	403	454	614

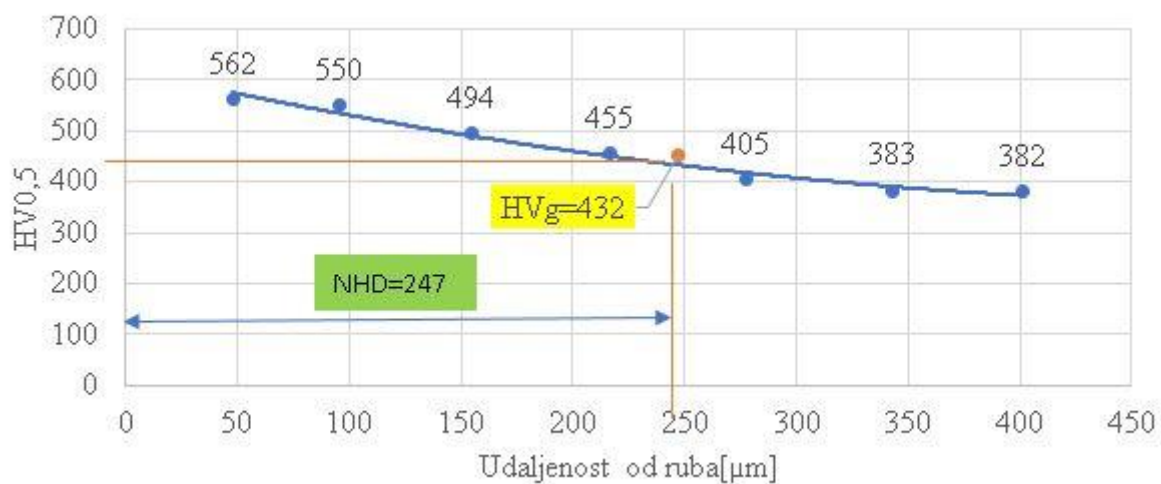


Sl. 61 Raspored mikrotvrdoće u plinski nitriranom sloju čelika 100Cr6 i određivanje efektivne dubine nitriranja

Točke su aproksimirane polinomom drugog stupnja iz čijeg se rješenja jednadžbe, nakon uvrštavanja vrijednosti NHD tvrdoće, dobije tražena udaljenost od ruba. Pritom treba paziti da se odabere fizikalni smisleno rješenje (kvadratna jednadžba)

Tablica 13 Raspored mikrotvrdoće po presjeku za uzorak nitriran u solnoj kupci TENIFER

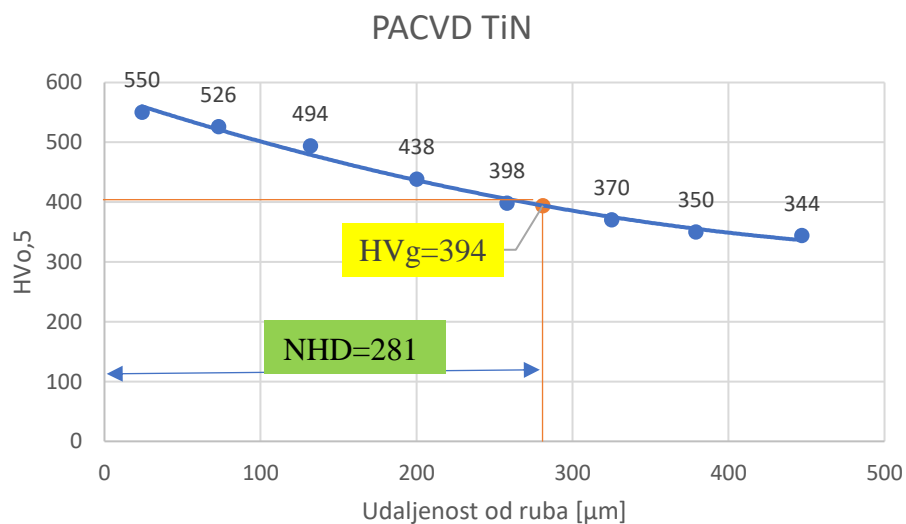
HV _{0,5}	562	550	494	455	405	383	382
Udaljenost od ruba[μm]	48	96	155	217	278	343	401



Sl. 62 Raspored mikrotvrdoće u površinskom sloju čelika 100Cr6 nitriranom postupkom TENIFER

Tablica 14 Raspored mikrotvrdoće po presjeku za uzorak za postupak PA CVD TiN

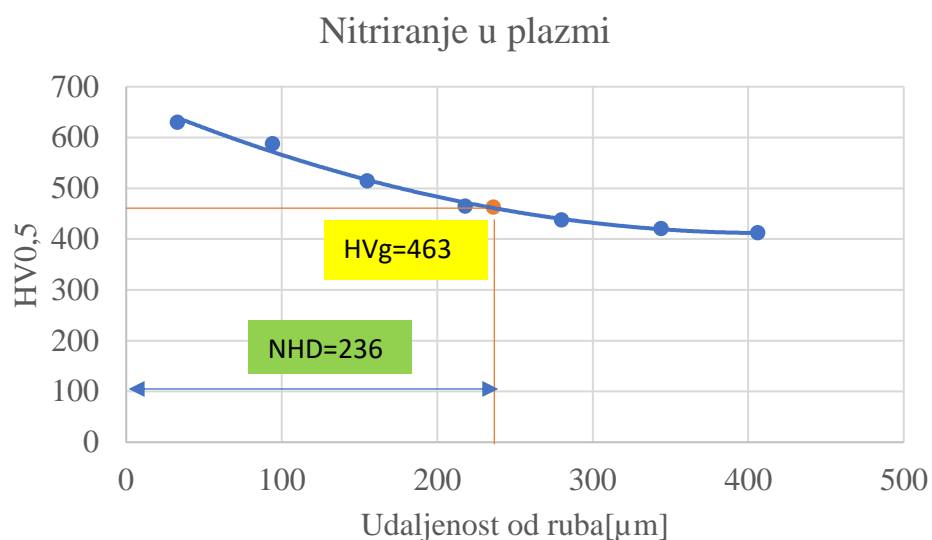
HV _{0,5}	550	526	494	438	398	370	350	344
Udaljenost od ruba [μm]	24	73	132	200	258	325	379	447



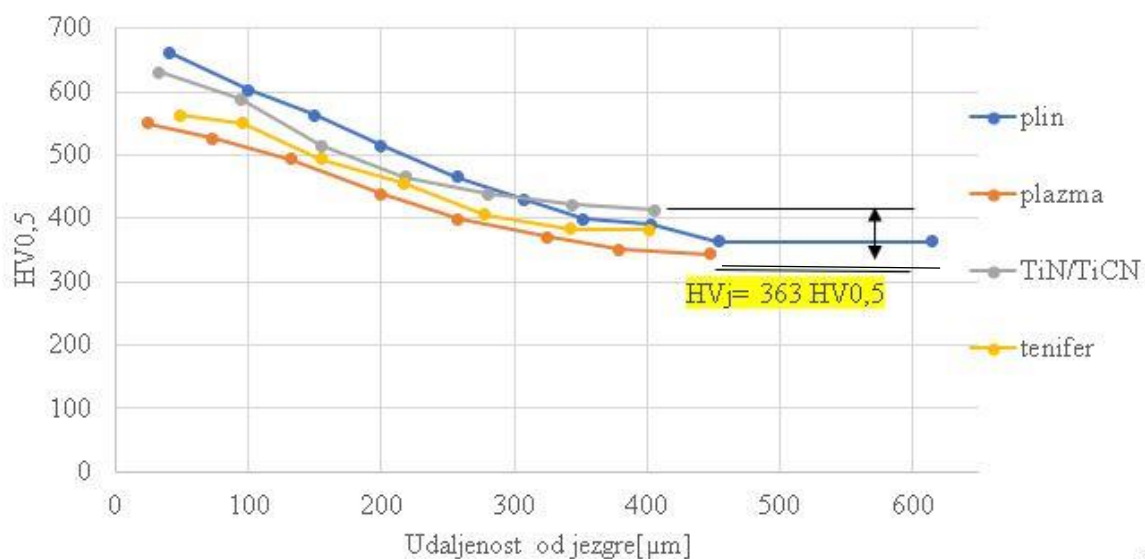
Sl. 63 Raspored mikrotvrdoće u površinskom sloju uzorka prevučenih prevlakom TiN PACVD TiN

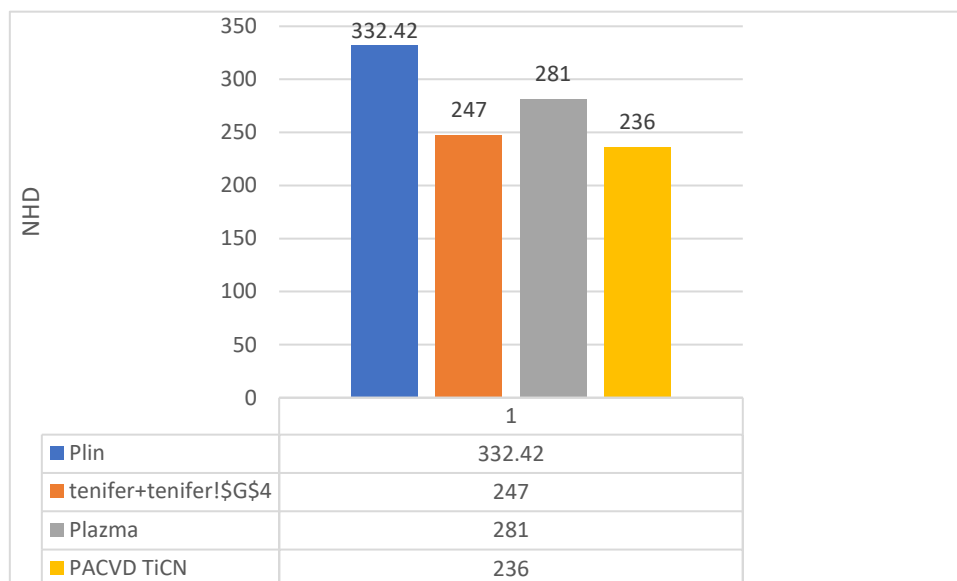
Tablica 15 Raspored mikrotvrdoće po presjeku za uzorak nitriran u plazmi

HV0,5	630	588	515	465	438	421	413
Udaljenost od ruba[μm]	33	94	155	218	280	344	406

**Sl. 64 Raspored mikrotvrdoća za uzorak nitriran u plazmi**

Usporedni prikaz tvrdoća po presjeku svih uzoraka je na grafu a efektivne dubine nitriranja su prikazane na Sl. 65 i Sl. 66 .

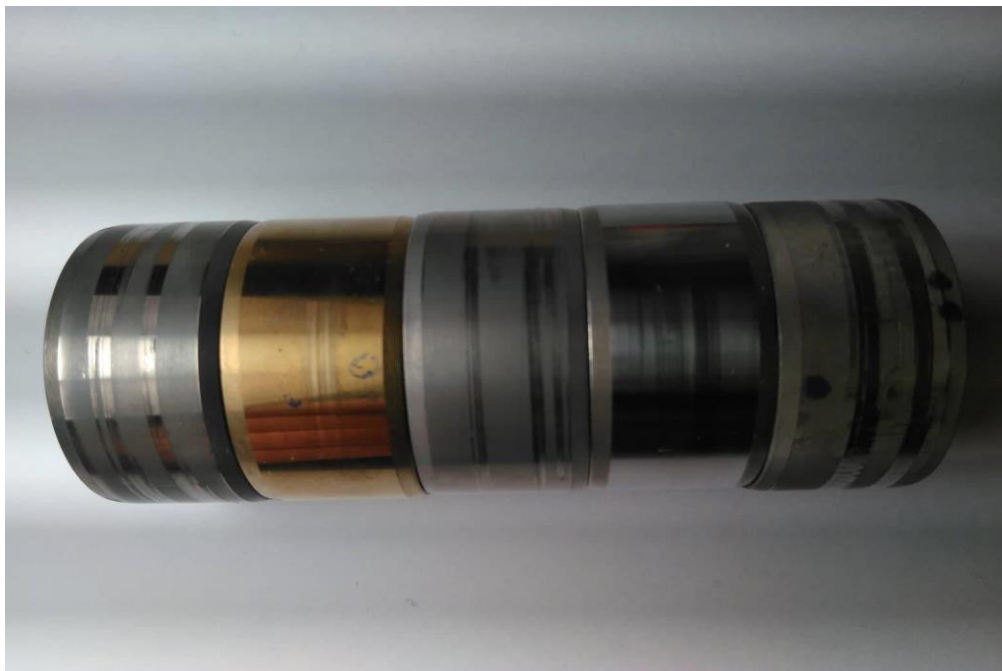
**Sl. 65 Raspored tvrdoće po presjeku svih uzoraka usporedno**



Sl. 66 Efektivne dubine nitiranja za uzorke s tretiranom površinom

Iz rezultata ispitivanja se vidi kako je prosječna tvrdoća jezgre 375.5 HV₀. Najveću efektivnu dubinu nitiranja ima plinski nitriran uzorak čija je efektivna dubina nitiranja 332 μm. Najmanju efektivnu dubinu nitiranja pokazuje uzorak sa TiN PACVD prevlakom čija efektivna dubina nitiranja iznosi 236 μm. Najveću površinsku tvrdoću pokazuju plinski nitriran uzorak čija površinska tvrdoća iznosi 660HV_{0,5} te plazmatski nitriran uzorak čija je tvrdoća 630 HV_{0,5}. Uspoređujući efektivnu dubinu nitiranja **NHD** sa izračunatom dubinom **z** na kojoj djeluju najveća posmična naprezanja može se zaključiti kako su svi toplinski tretirani uzorci dobro zaštićeni od maksimalnog posmičnog naprezanja τ_{\max} koje djeluje na dubini od 12,4 μm. Razlog tome je što je kod svih uzorak dušika dobro difundirao na tako maloj dubini.

10.5. Širina traga trošenja



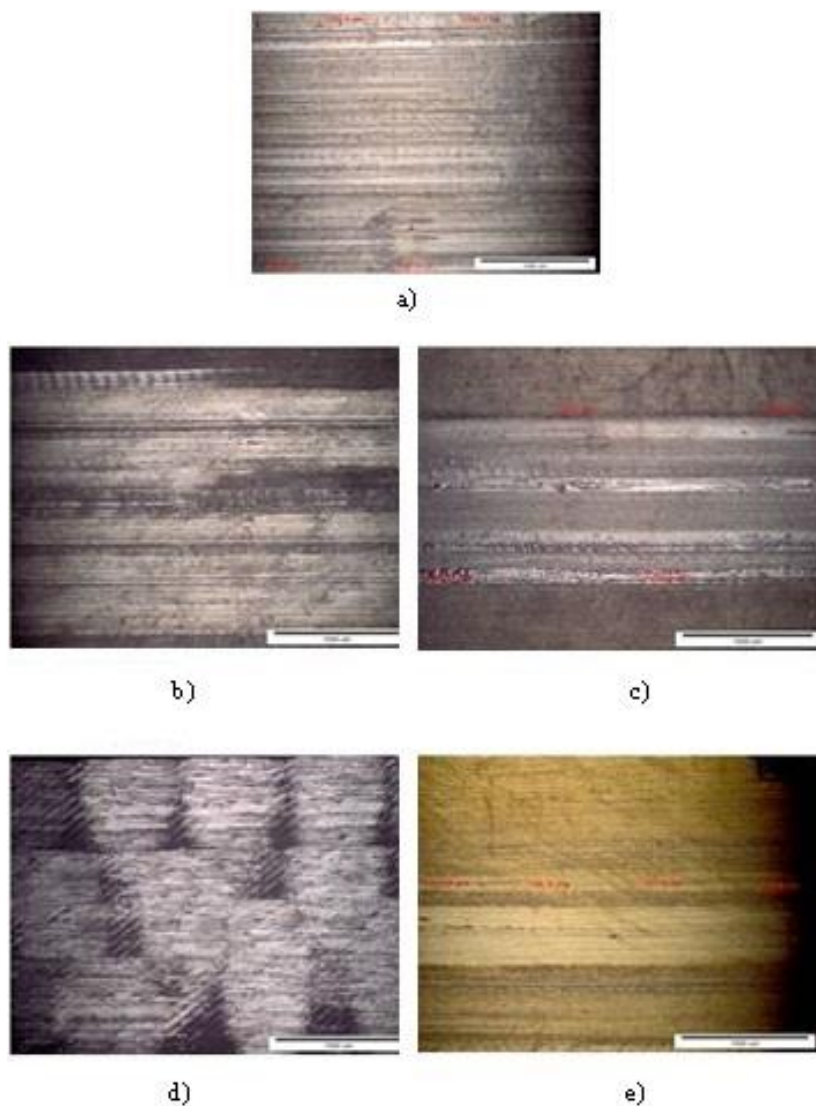
Sl. 67 Trag trošenja nakon ispitivanja

Na Sl. 67 vide se oba traga trošenja, prstenovi su posloženi tako da trag s lijeve strane predstavlja normalnu silu od 11 N dok trag s desne strane predstavlja normalnu silu od 20 N.

Mjerenjem debljine tragova trošenja pomoću svjetlosnog mikroskopa dobiveni su rezultati u Tablica 16.

Tablica 16 Debljine trošenja za različite normalne sile

	osnovno	PACVD TiN	plin	plazma	TENIFER
F1=11N	1921 μ m	162 μ m	1255 μ m	1295 μ m	1987 μ m
F2=20 N	2292 μ m	470 μ m	2387 μ m	2300 μ m	2387 μ m



Sl. 68 Tragovi trošenja a)Osnovno b)Plinski nitrirano c)Plazma d)TENIFER) e)PACVD

Na Sl. 68 se vide različiti izgledi površine trošenja. Najmanju debljinu traga trošenja pokazao je uzorak sa PACVD TiN prevlakom. Uzorak u polaznom stanju i onaj sa PACVD prevlakom su, osim po iznosima faktora trenja, slični i po ujednačenosti traga trošenja. Kod ostalih je vidljiva nehomogenost traga karakterizirana naglim smanjenjem i povećanjem trošenja.

ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata ispitivanja ležajnih prstenova od čelika 100Cr6 te toplinski obrađenih nitriranjem (u plinu, solnoj kupci, plazmi) ili prevučenih prevlakom TiN PACVD zaključuje se slijedeće:

- Faktor trenja je moguće precizno ispitivati moderniziranom verzijom postupka blok na prstenu koje se pokazalo kao puno pouzdanije zbog mogućnosti nadzora i bilježenja trenutnih rezultata tijekom pokusa. U ovoj varijanti postupka zbog veće frekvencije očitavanja rezultata moguće je također i točnije ocijeniti vrstu trošenja na temelju zabilježenih oscilacija. Raspon normalnih sila za koje se pouzdano mogao utvrditi faktor trenja u eksperimentu iznosio je od $F_N=11\text{N}$ do $F_N=60\text{N}$.
- Faktor trenja se povećao prilikom svih provedenih toplinskih tretiranja površine. Ipak, izrazito su slične vrijednosti faktora trenja kod osnovnog i uzorka prevučenog slojem PACVD TiN što govori o kvaliteti postupka prevlačenja. S druge strane podloga dobivena nitriranjem u solnoj kupci TENIFER pokazuje značajan porast faktora trenja u iznosu od 164 % što je bilo za očekivati obzirom na prisutnost porozne zone spojeva koju je prvo potrebno potrošiti kako bi se omogućio tribološki povoljniji rad. Uzorci nitrirani u plinu i plazmi pokazuju podjednak porast faktora trenja (19 % i 24 %).
- Povećanjem sile proporcionalno se povećao i faktor trenja što je sukladno prethodnim teorijskim saznanjima. Iznimka je uzorak nitriran u solnoj kupci TENIFER kod kojeg je razlika između faktora trenja pri silama $F_1=11\text{ N}$ i $F_2=20\text{ N}$ neznatnih 3 %.
- U provedenim ispitivanjima zona pojave najvećih vrijednosti kontaktnih Hertz-ovim naprezanja predviđa se na $12,4\text{ }\mu\text{m}$ što se u svim ispitanim slučajevima nalazi u području difuzijske zone. Stoga u ispitivanjima nije uočeno makro otkrhuće zone spojeva, već samo njeno uobičajeno adhezijsko trošenje.

U daljnjim ispitivanjima preporučuje se provođenje ispitivanja sa višim i nižim iznosima normalnog opterećenja kako bi se utvrdilo granični iznos normalne sile (a time i iznos faktora trenja) kod kojeg se ostaje unutar radnog područja senzora.

LITERATURA

- [1] <http://www.tribonet.org/tribology-testing-standards/>
- [2] Decker K. H., Elementi strojeva, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2000.
- [3] Grilec K., Jakovljević S., Marić G., Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [4] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Trenje>
- [5] Kraut, B., Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [6] <https://nptel.ac.in/courses/112102015/6> pristupljeno 1.5 2019
- [7] Ashby M, Jones D, Engineering materials , An introduction to Properties, Applications and Design 2004
- [8] Alfrević I, Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga, Zagreb 1995
- [9] <https://electrical-engineering-portal.com/purpose-and-working-principle-of-inductive-sensors> Pristupljeno 2.5 2019
- [10] <https://www.ifm.com/mounting/701938UK.pdf>
- [11] Runje B., Predavanja iz kolegija , ,Teorija i tehnika mjerenja ‘ ‘ Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015
- [12] Gwidon W. Stachowiak and Andrew W. Batchelor 2014 Engineering tribology 4th Edition • 2014
- [13] Dragan Žeželj, Istraživanje nosivosti klizno valjnih parova, magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje,
- [14] Landek D., Predavanje iz kolegija „Posebni metalni materijali“, dio „Alatni materijali“, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2017.
- [15] Matijević B., Predavanja iz kolegija „Toplinska obrada“, Toplinsko-kemijsko modificiranje površine čelika, karbonitriranje, nitriranje, nitrokarburiranje, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2016.
- [16] Kovačić S., Vježbe iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017
- [17] Mirko Gojić, Površinska obrada materijala, Sisak 2010
- [18] Krumes D., Toplinska obradba, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.
- [19] Matijević B., Predavanja iz kolegija „Toplinska obrada“, Toplinsko-kemijsko modificiranje površine čelika, karbonitriranje, nitriranje, nitrokarburiranje, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2016.

- [20] Kovačić S., Vježbe iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016
- [21] Karakterizacija materijala podloge FSB
- [22] Mirko Gojić, Površinska obrada materijala, Sisak 2010